



# Análisis de sellado de suelos en varios municipios de la Comunidad de Madrid

---

Comparación de la pérdida de suelo entre  
1987 y 2011.

## Contenido

1. Introducción.....	2
2. Objetivo.....	3
3. Área de estudio.....	3
4. Material.....	4
5. Metodología.....	5
5.1 Análisis y fotointerpretación de la zona.....	5
5.2.Cálculo de diferentes índices.....	8
- Índice de vegetación ajustada al suelo (NDVI).....	8
- Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI).....	8
- Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI):.....	8
5.3.Clasificación de los índices.....	9
5.4.Corrección de la clasificación, reclasificando los valores erróneos.....	9
5.5.Evaluación de exactitud del suelo sellado de las diferentes clasificaciones.....	22
5.6.Comparación y cálculo de la pérdida de suelos en cada zona.....	31
5.7. Mejoras que se podrían realizar a la imagen de clasificación final.....	32
6. Resultados (Discusión).....	33
7. Conclusiones.....	40
8. Agradecimientos.....	40
9. Bibliografía.....	41

## 1. Introducción.

El sellado del suelo se entiende como actuación de forrar de forma permanente la superficie terrestre con materiales artificiales, que hacen que el suelo sea impermeable de manera artificial, algunos de los materiales que se emplean son el cemento y el asfalto entre otros. Con este proceso de transformación de la superficie perdemos la estructura natural del suelo.

El suelo es un elemento importante en la naturaleza porque interviene en el ciclo del agua y en el de los elementos. La regeneración es muy lenta, por eso se debe considerar como un recurso no renovable y cada vez más escaso, debido a que cada vez está más sometido a constantes procesos de degradación y destrucción. Por degradación se entiende la pérdida total o parcial de la productividad, cuantitativa o cualitativamente, como consecuencia de procesos de erosión, contaminación, agotamiento de nutrientes, etc. (FAO, 1984).

Estos procesos son debidos al crecimiento de los núcleos urbanos, así como de las infraestructuras de comunicación, que aquí incluimos todo tipo de carreteras, aeropuertos, vías de ferrocarril, etc. Este último es uno de los factores que más influye para la destrucción del suelo, ya que la ocupación supone una pérdida indefinida o muy alta de este recurso.

En Europa tenemos un problema a cuenta del suelo sellado, debido a que este es el continente más urbanizado. Y además cada año se reclama para uso humano una superficie adicional de 1000 km<sup>2</sup> (mayor que la de la ciudad de Berlín), gran parte de la cual acaba siendo sellada. Si esta tendencia se mantiene al ritmo actual, en un plazo de 100 años habrá quedado cubierta un área comparable a la suma de los territorios de Francia y España.

Por ello la Comisión Europea ha dado unas nuevas directrices sobre las mejores prácticas para limitar, atenuar y compensar el sellado del suelo donde se recogen ejemplos de políticas, legislación, regímenes de financiación, instrumentos de planificación local, campañas de información y muchas otras prácticas aplicadas en la UE en su conjunto. Las Directrices recomiendan una ordenación territorial más racional y la utilización de materiales más permeables a fin de preservar el suelo. Todo esto se expresa en el documento de trabajo de los servicios de la comisión *"Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo"* (Bruselas 2012)

Anteriormente ya teníamos otro documento donde también se discutía el sellado del suelo, donde se abordaba en la Estrategia Temática para la Recuperación del Suelo y la propuesta de Directiva por la que se establece un marco para la protección del suelo. Las Directrices se basan en la reciente *"Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos"* publicada por la Comisión Europea el 20 de septiembre de 2011. La hoja de ruta propone que en el horizonte de 2020, las políticas de la UE tengan en cuenta el impacto directo e indirecto en el uso del suelo, y que la proporción de suelo utilizado (es decir, la pérdida de terreno agrícola, semi-natural o natural) esté en consonancia con el propósito de detener la explotación neta del suelo como muy tarde en 2050.

Otros de los propósitos que tiene la Unión Europea es que a partir del año que viene, cada país tenga actualizada una capa con todas las edificaciones de cada región y que ésta se actualice actualmente. Este proyecto en España lo va llevar a cabo el IGN, donde están estudiando cómo hacerlo automáticamente, para ello se están estudiando varios programas para llevarlo a cabo.

## 2. Objetivo.

El objetivo del presente estudio es analizar cuál es la mejor metodología, a través de diferentes índices, para el análisis del sellado del suelo y para comprobar la evolución del sellado entre los años 1987 y 2011 (24 años) en diferentes poblaciones de Madrid.

Una vez elegida la mejor metodología se procederá al estudio comparativo de la pérdida de suelo en 24 años.

## 3. Área de estudio.

El estudio que se va a realizar se dividirá en dos zonas, todas ellas distribuidas alrededor de la ciudad de Madrid. Estas van a estar compuestas por varios municipios, y las vamos denominar numéricamente como Zona 1 y Zona 2. Las composiciones de los municipios también se han dividido en municipios con valores económicos y sociales diferentes. Para ver y comparar como crecen los municipios en función de estos dos valores.

La Zona 1 está compuesta por 5 municipios situados al noroeste de la capital, los cuales son Majadahonda, Las Rozas de Madrid, Torrelodones, Pozuelo de Alarcón y Boadilla del Monte.

- **Majadahonda** situado a 16 km al noroeste de la Puerta del Sol de Madrid y con una superficie de 38,48 km<sup>2</sup>. Originariamente este municipio estaba compuesto por cultivos y pastoreo. En 2013 la población era de 70.386 habitantes (INE 2013). Su expansión ha sido acelerada, como en todos los pueblos y ciudades pertenecientes el área metropolitana de Madrid.
- **Las Rozas de Madrid** es uno de los más extensos de la Provincia de Madrid (España), ya que su superficie es de 59,14 km<sup>2</sup>. Las Rozas es uno de los municipios con la renta per cápita más elevada de la Comunidad de Madrid. En 2013 la población era de 91.806 habitantes (INE 2013).
- **Torrelodones** es un municipio del noroeste de la Comunidad, situado a 21 kilómetros de Madrid y con una superficie de 21 km<sup>2</sup>. Actualmente habitan en el pueblo 22.782 personas según los datos oficiales del empadronamiento, distribuidas en siete núcleos de población. Siendo este municipio uno de los que mayor renta per cápita de la Comunidad de Madrid. Por su localización entre la sierra de Guadarrama y el área metropolitana de la capital, está vinculado a dos comarcas madrileñas: la comarca agrícola de Guadarrama y la corona metropolitana de Madrid.
- **Pozuelo de Alarcón** este municipio situado al oeste de la Capital con una extensión de 43,2km<sup>2</sup> y a unos 8 km de la capital. Es el municipio con mayor renta por habitante de la Comunidad de Madrid. En 2013 la población era de 84.474 empadronados (Padrón Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón, Enero de 2014).
- **Boadilla del Monte** situado en la zona oeste del área metropolitana de la capital y con una superficie de 47,24 km<sup>2</sup>. En 2013 contaba con una población de 47.587 habitantes. Podemos encontrar diferentes tipos de Vegetación, tales como encinas, pinos, material leñoso y pastizales.

La Zona 2 también está compuesta por 5 municipios situados al sur de la capital, los cuales son Getafe, Leganés, Fuenlabrada, Pinto y Parla.

- **Getafe** es una ciudad situada en la zona sur de la Comunidad a 13 Km de la del centro de la capital y es uno de los municipios más industrializados del área metropolitana de Madrid. La cercanía de este a Madrid ha propiciado un gran desarrollo industrial a lo largo del siglo XX, aumentando así la población hasta los 172.526 habitantes (INE 2013).
- El término municipal de **Parla**, que tienen una extensión aproximada de 24.43 km<sup>2</sup> y una densidad de población de 5.311 habitantes por km<sup>2</sup>. Actualmente tiene una población de 128.871 (INE 2013).
- El municipio de **Fuenlabrada** se encuentra en la zona sur, teniendo una superficie de 39,41 km<sup>2</sup>, cuenta según el padrón municipal para 2013 del INE con 197.520 habitantes y una densidad de 5.011,93 hab./km<sup>2</sup>. Las actividades económicas principales en esta región son la industria y los servicios.
- **Pinto** es una localidad situada a unos 20 km al sur de la capital y a una altitud de 604 m. Actualmente según el censo de 2014 su población total empadronada es de 48.167 habitantes. En la actualidad a pesar de su modernidad, la preocupación por conservar su entorno natural ha convertido Pinto en el municipio madrileño de la zona sur con mayor extensión de espacios verdes por habitante (27 metros cuadrados).
- **Leganés** situado a 11 kilómetros al sur suroeste de la madrileña Puerta del Sol, dentro del Área Metropolitana de Madrid y con una superficie de 43,1km<sup>2</sup>. Se ubica en una llanura de la Meseta Central en la península Ibérica, surcada de oeste a este por el cauce del arroyo Butarque, afluente del río Manzanares. Es la quinta ciudad madrileña en población tras Madrid capital, Móstoles, Alcalá de Henares y Fuenlabrada, según datos del padrón municipal del año 2010. Actualmente la ciudad cuenta con una población de 188.905 habitantes (Ayuntamiento de Leganés 2014).

A continuación se presenta una tabla con los datos de población en las diferentes localidades en el periodo de estudio 1987 -2011.

	MUNICIPIOS	POBLACION	
		1987	2011
<b>ZONA 1</b>	<b>Majadahonda</b>	29.756	70.076
	<b>Las Rozas de Madrid</b>	22.255	89.115
	<b>Torreldones</b>	5.249	22.354
	<b>Pozuelo de Alarcón</b>	36.551	82.916
	<b>Boadilla del Monte</b>	8.694	46.151
<b>ZONA 2</b>	<b>Getafe</b>	132.786	170.115
	<b>Parla</b>	64.546	121.995
	<b>Fuenlabrada</b>	122.752	198.560
	<b>Pinto</b>	20.474	45.643
	<b>Leganés</b>	167.748	186.552

#### 4. Material.

Para el trabajo de análisis de la evolución del suelo sellado se han utilizado imágenes de satélite de resolución espectral media, de los satélites Landsat y Spot. Las fechas de las imágenes se han elegido según la disponibilidad de datos de estos satélites y la accesibilidad,

para la adecuada selección de imágenes y fechas que permitan analizar diferentes problemas de la degradación de suelos, ha sido posible gracias al Plan Nacional de Teledetección del Instituto Geográfico Nacional y a los servidores de descarga gratuita USGS.

La siguiente tabla muestra las características de las imágenes que se han utilizado para el trabajo:

IMÁGENES SELECCIONADAS. FUENTE USGS E IGN

SATELITE	SENSOR	ESCENA	SITUACION	FECHA
LANDSAT 5	TM	201 - 32	Comunidad de Madrid	07-05-1987
LANDSAT 5	TM	201 - 32	Comunidad de Madrid	09-05-2011
SPOT	HRV 5*	268- 33	Comunidad de Madrid	21-05-2010
SPOT	HRV 5*	268- 35	Comunidad de Madrid	17-09-2011
SPOT	HRV 5*	269-33	Comunidad de Madrid	21-05-2010

\* Haute Resolution Visible

Para el análisis y evaluación, que se detalla en los siguientes apartados, hemos utilizado distintos productos. Para la imágenes del 2011 hemos utilizado las ortofotos de los años 2009 al 2011, creando dos mosaicos uno con cada zona. Estas imágenes nos las ha proporcionado El Instituto Geográfico Nacional (IGN) a través de su página web, donde nos las hemos descargado. El otro producto que hemos comparado es el Mapa de Usos del Suelo de la Comunidad de Madrid del año 1987, donde nos indican los diferentes usos urbanos, como industrial, residencial, núcleo urbano, etc.

## 5. Metodología

La metodología empleada se divide en seis grandes partes: análisis y fotointerpretación de las zonas de estudio, cálculo de diferentes índices, clasificación de los mismos, corrección de la clasificación, la evaluación de estas y comparación y cálculo de la pérdida de suelos en cada zona. Estas etapas se detallan a continuación.

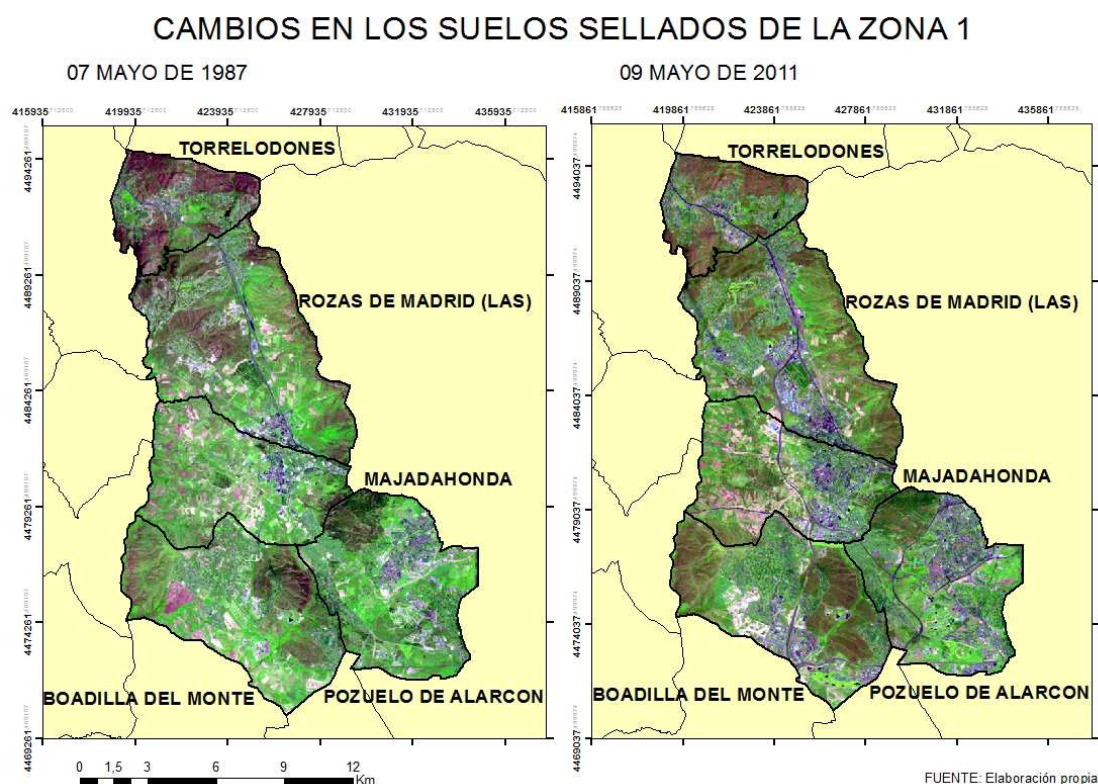
### 5.1 Análisis y fotointerpretación de la zona.

Para empezar el estudio lo primero que se debe hacer es conocer las zonas de estudio y ver cómo han evolucionado estas entre los años 1987 y 2011. Por eso se va a comenzar fotointerpretando las diferentes zonas de estudio con la combinación de bandas que mejor describa este cambio y así poder comparar las dos imágenes y ver qué ha cambiado en estos años. Para analizar los diferentes municipios se van a usar las imágenes Landsat ya que esta tiene mayor resolución espectral para crear posibles combinaciones. Las bandas que mejor reflejan los suelos son las bandas 5 y 7 que son las dos infrarrojos medios, con lo cual sería importante que aparecieran alguna de la dos bandas en nuestra combinación.

Una vez analizado las diferentes posibilidades para la combinación, se ha optado por analizar la imagen con la combinación 5-4-3, puesto que esta refleja mejor las dos cubiertas que más queremos diferenciar que son los suelos contruidos de la vegetación. Viendo a simple vista el cambio que ha tenido nuestra zona en estos años. A la composición de bandas que vamos a usar se la denomina falso color natural, dándonos la vegetación en gamas de verdes lo que nos ayuda a la rápida visualización e identificación de estos. La banda 5ª que es el infrarrojo medio

nos da los suelos, la 4ª nos identifica la superficie foliar y la clorofila; es decir las diferentes tipos de vegetación y por último la banda 3ª nos indica donde encontramos cubiertas sin vegetación.

En la primera zona que está situada noreste de la capital y que está situada muy cerca de la sierra de madrileña podemos observar grandes cambios en estos 24 años. Lo que más llama la atención es como han crecido los municipios y como estos están muy cerca unos de los otros. Otra de las cosas que llama la atención de una imagen a otra es como se han incrementado las infraestructuras viarias. Además, por los llamativos que son los colores morados de las imágenes del año 2011, estas vías son anchas y con muchos carriles. En cuanto a la vegetación, se puede observar que en la imagen del año 1987 hay mucha más vegetación, ya que la imagen tiene muchas gamas de verdes, aunque cabe destacar en la imagen más actual, parece que tenemos más bosques (caducifolios o conífero), esto puede ser debido a repoblaciones y a la recuperación de masa forestal conforme se disminuye la actividad agrícola. También se ven muchas aéreas de pastizales en colores rosas claros o en los casos que tengan forma de parcela agrícola de eriales y en colores beige encontramos suelos erosionados o barbechos. Si se observan en estos dos colores vemos que en el año 2011 son más abundantes y además muchos están concentrados en las zonas cercanas a las carreteras. Esto indica pérdida de vegetación.

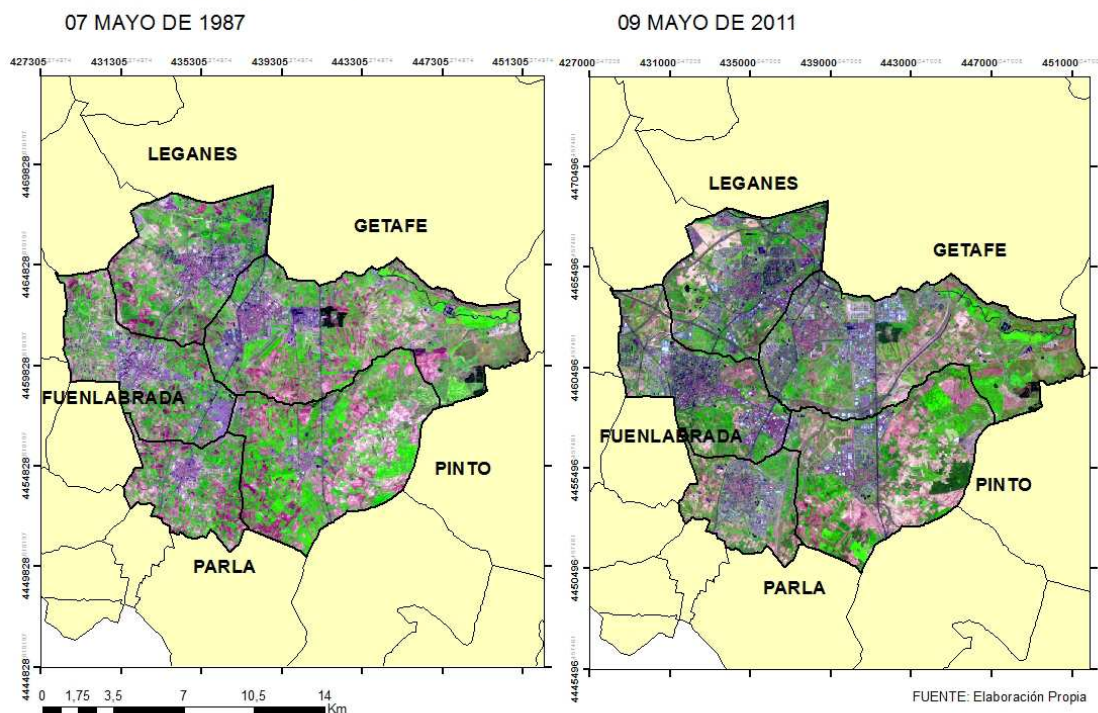


La segunda zona se encuentra al sur de la capital y cómo se puede ver en las imágenes se ve que este sector es más árido y no encontramos tantos tipos de vegetación, destacando verdes claros y muchos rosas, que van desde una gama rosa oscuro a rosas muy claros, que corresponden a muchos eriales o pastizales. En estos municipios el cambio visual no es tan brusco, debido a que en este área los núcleos urbanos eran más grandes que en la zona



anterior, pero aun así observamos que los pueblos han crecido mucho, estando unidos muchos de ellos. Además también destacan muchos azules claros o lilas que nos indican naves industriales, es decir que esta parte sur ha crecido mucho en cuantos a zonas industriales ya que el suelo es más barato aquí, aparte de tener más llanuras de fácil construcción. Fijándose en el municipio de Getafe se puede observar que por esa zona se ha perdido mucha vegetación, pasando de colores verdes a ser la mayoría suelos desnudos o degradados, con poca vegetación. Pudiendo ser zonas en construcción o simplemente suelos muy degradados. También por esta zona de la imagen podemos destacar nuevas vías de comunicación tanto ferroviarias, como redes viarias, destacando estas en tonos lilas. Si se habla de las vías de comunicación la imagen es muy llamativa que en 1987 solo vemos colores morados en las carreteras que unen los diferentes municipios entre sí, mientras que actualmente además de esas vías se pueden apreciar que se han construido vías de circunvalación que comunican toda la comunidad. Por último, habría que destacar que en estos cinco municipios sí que se ha perdido mucho suelo, ya que hay zonas entre municipios que lo único que quedan son suelos desnudos, los cuales vemos de color blanco, por no tener nada de vegetación ya que son zonas urbanizadas sin construir aún. Siendo estos suelos urbanizados que algún día pasaran a ser más construcciones, llegando a perder casi toda la vegetación, excluyendo zonas de parques y campos de golf, como el que vemos en la superior izquierda de la imagen.

### CLASIFICACION DE LA ZONA 2 A TRAVES DEL INDICE SAVI





## 5.2. Cálculo de diferentes índices.

Se han seleccionado tres índices de los muchos que existen, escogiendo NDVI, SAVI y NDBI. Los dos primeros son índices de vegetación y el tercero se caracteriza por ser un índice de edificación.

### - Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. El NDVI nos da valores -1,0 y +1,0, que se calculan de la siguiente manera:

$$\text{NDVI} = (\text{IRC} - \text{ROJO}) / (\text{IRC} + \text{ROJO})$$

### - Índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI)

El Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección de brillo del suelo. Siendo esta la fórmula que utiliza:

$$\text{SAVI} = ((\text{IRC} - \text{ROJO}) / (\text{IRC} + \text{ROJO} + L)) \times (1 + L)$$

IRC y rojo se refiere a las bandas asociadas con aquellas longitudes de onda. El valor L varía dependiendo de la cantidad de cubierta vegetativa verde. Generalmente, en áreas con cubierta de vegetación verde  $L=1$ . Este índice coloca los valores entre -1,0 y 1,0, como el anterior.

Se trata de un índice muy adecuado para trabajos en zonas semiáridas, en donde la cubierta de vegetación es baja. Así donde se realice un estudio sobre una zona con estas características, este índice resultará más consistente que el NDVI, gracias a esa mayor distinción entre el suelo y la vegetación. Para la zona que hemos elegido no sería mala opción, puesto que la Comunidad de Madrid se caracteriza por un clima semiárido, con marcada sequía estival, por lo que en esta estación los suelos tienen una alta reflectancia y se discriminan bien los suelos sellados, aunque en este caso elegimos las imágenes de mayo, pensando en el NDVI, donde los cereales están ya con actividad.

### - Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI)

El índice de diferencia normalizada edificada es un índice que permite estimar zonas con superficies construidas o edificadas y las superficies desnudas. Al igual que los índices anteriores, este índice se expresa en valores de -1,0 a 1,0, indicando presencia de cubiertas vegetales donde los valores son menores de cero (valores negativos) y los mayores de cero (valores positivos) son indicadores de cubiertas edificadas y suelos desnudos.

Calculándose a través de la ecuación siguiente:

$$\text{NDBI} = (\text{IRM} - \text{IRC}) / (\text{IRM} + \text{IRC})$$

### 5.3. Clasificación de los índices.

Una vez creados los tres índices de los diferentes años, se clasifican los valores que dan dichos índices, para intentar clasificar los suelos sellados de las zonas elegidas. Para ello se analiza la imagen y sus valores en una fotointerpretación rápida. Una vez que se conocen las clases que se clasifican en la imagen, se seleccionan muestras de cada categoría generando firmas, para reflejar adecuadamente la variabilidad, y después con un algoritmo clasificador obtener el valor que mejor representa esa clase. Entre los algoritmos que tiene esta herramienta se usaron el de máxima probabilidad y el de mínimas distancias, quedándose con el que mejor clasificación genere. Así una a una consiguiendo discriminar cada categoría. El objetivo es clasificar bien el suelo sellado, por eso no se clasificará el resto con mucha precisión ni muy exhaustivamente. Las clases que se diferencian son: suelo sellado continuo o discontinuo, dependiendo la zona, suelos desnudo o degradado, frondosas - cultivos, eriales, vegetación y pastizales.

Después de clasificar todas las imágenes, se ve que hay zonas donde se conoce que está mal clasificada, aquí se tienen que corregir esos valores de píxel con la verdad terreno y fotografías aéreas de fechas coetáneas, para que la clasificación esté correcta.

En algunos índices el sellado se ha clasificado en dos clases diferentes porque la respuesta que se obtenía del píxel era muy diferente, dando errores en otras clases. Siendo imposible discriminarla.

### 5.4. Corrección de la clasificación, reclasificando los valores erróneos.

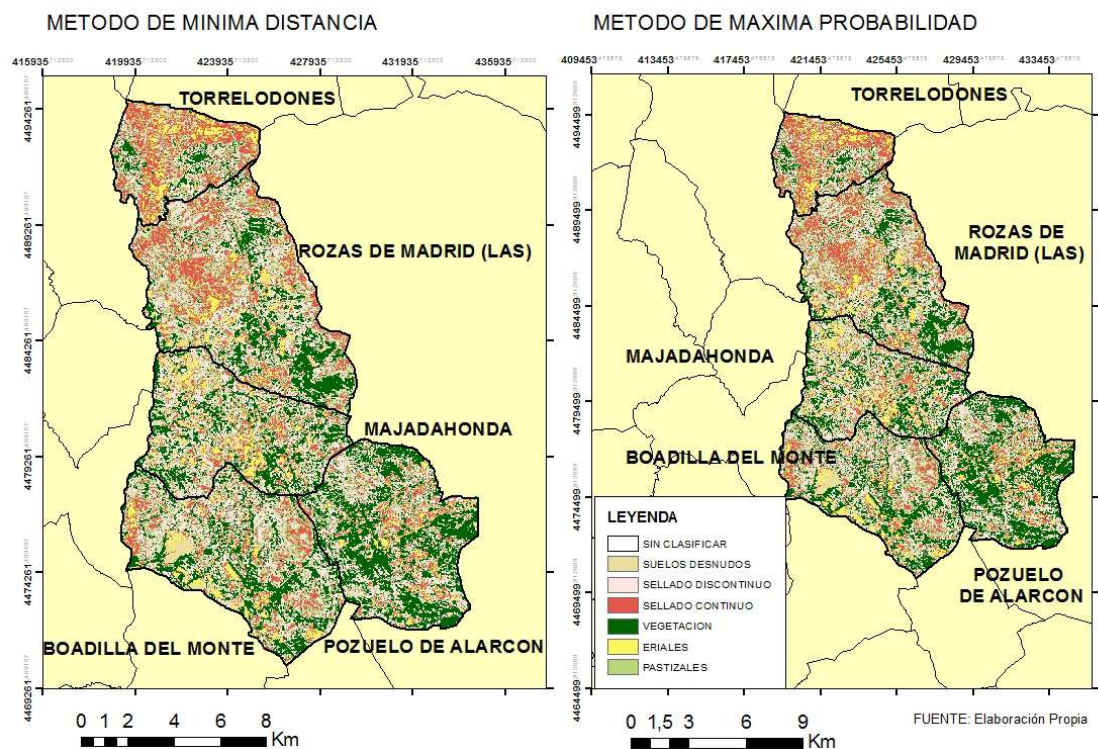
Después de la clasificación, se observa que muchos de los píxeles que se sabe que deberían ser una clase aparecen como otra y viceversa puesto que el valor del índice es similar. Por eso se tienen que corregir las clasificaciones conseguidas en el paso anterior. Para ellos se va a digitalizar polígonos en la área donde se sabe que la clase es incorrecta, y después con la tabla de atributos y la herramienta *recode* se pasa a darle la categoría que le corresponde. Aunque también en alguna de las imágenes se ha tenido que unir alguna clase, porque representaba más otro uso que el que se le había dado. Esto se debe a que los valores de los índices varían muy poco de un uso a otro. Por lo que es muy difícil discriminar una clase de otra.

#### - Correcciones realizadas a cada imagen.

##### 1. Zona 1. Clasificación del NDBI de 1987.

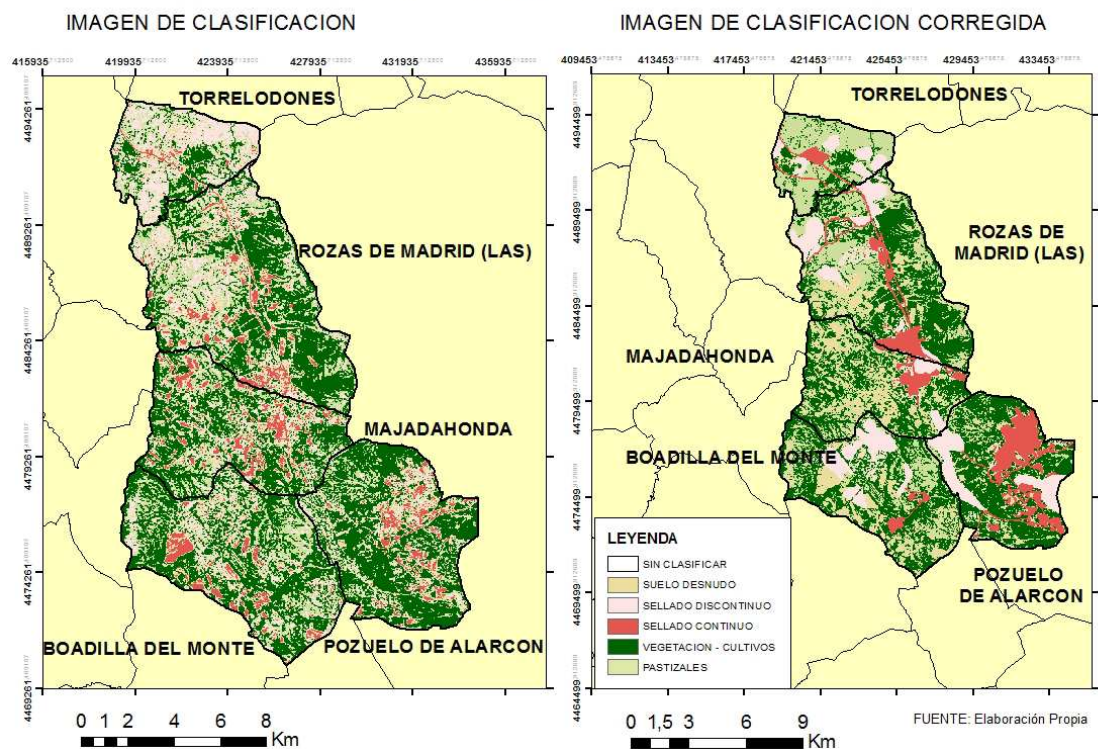
Esta clasificación se ha descartado, ya que los resultados que proporciona son muy malos. Tanto si se clasifica por la máxima probabilidad como si se hace por la mínima distancia, no teniendo apenas diferencias entre una y otra. No discrimina ni un solo uso bien, aunque lo que mejor diferencia es la vegetación. Lo demás sería imposible corregirlo ya que tendríamos que digitalizar toda la imagen y para hacer ese proceso habría que saltarse hacer el índice y la clasificación. Aunque esto no merecería la pena por ser muy laborioso.

## CLASIFICACION DEL INDICE NDBI DE 1987



### 2. Zona 1. Clasificación del SAVI de 1987.

## CLASIFICACION DEL INDICE SAVI DE 1987

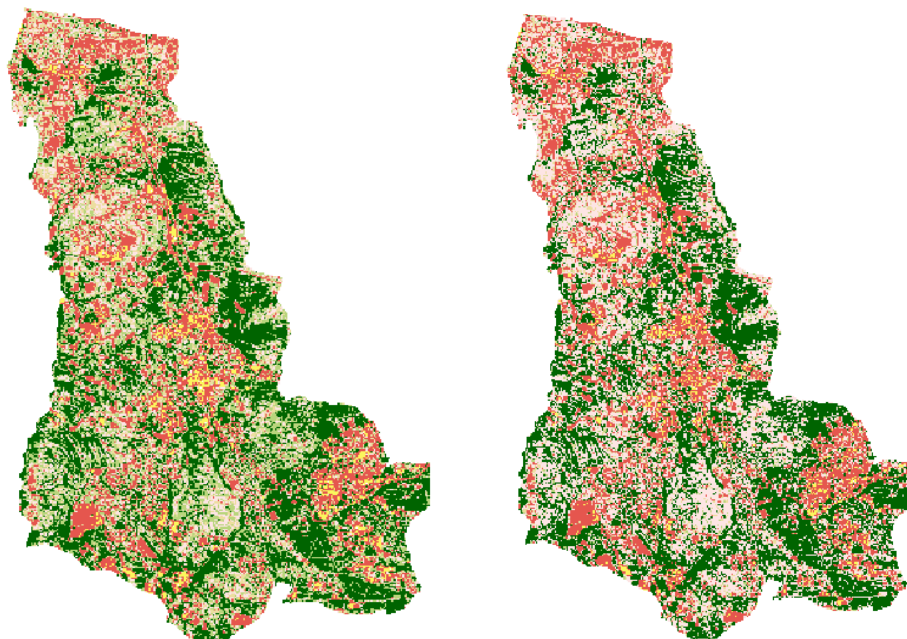


El mayor problema de esta imagen ha sido que las zonas construidas la mayoría las clasificaba como sellado discontinuo y en cambio los suelos desnudos o degradados y los eriales los ponía en el uso de suelo sellado continuo confundiendo entre ambos usos, esto es a causa de que los dos tenían prácticamente valores iguales con lo que era muy difícil su clasificación. Con lo que se ha corregido estos dos errores y se obtiene una clasificación supervisada con una alta fiabilidad, a excepción de algún error en algunas zonas, que no nos ha clasificado las carreteras.

### 3. Zona 1. Clasificación del NDVI de 1987.

Fotointerpretando la imagen del índice NDVI se identifican muy bien las carreteras y los sellados continuos, estos últimos representando edificios individuales bastante concentrados con los del alrededor y sin grandes jardines. Pero analizando más la imagen se ve que esta clase se confunde con los barbechos, dando valores muy similares. Esto parecido pasa en la clase de pastizal con la de sellado discontinuo, variando mínimamente los valores. Por lo que será difícil su clasificación. Para resolver este problema en la generación de signaturas, se ha intentado separar más las clases, para que a la hora de generar la clasificación se separen mejor los usos y la corrección de la imagen sea más sencilla. Luego se unirán todas estas separaciones de sellado para que queden en las dos clases que tenemos en nuestro sector.

La clasificación se ha realizado por los dos métodos, comprobando que el método de mínimas distancias es considerablemente el mejor. Debido a que en la imagen de mínimas distancias confunde mucha cobertura de pastizal como suelo sellado discontinuo. Y en cambio en la de mínimas distancias únicamente falsea por el norte del municipio de Torrelodeón, los sellados continuos con las zonas de pastizal rocoso. Debido a que las rocas no tienen vegetación y el índice lo clasifica como tal. Esta última tendría una corrección es más sencilla y rápida.



De izquierda a derecha tenemos la imagen de clasificación por el método de mínimas distancias y la imagen clasificada por el método de máxima probabilidad.

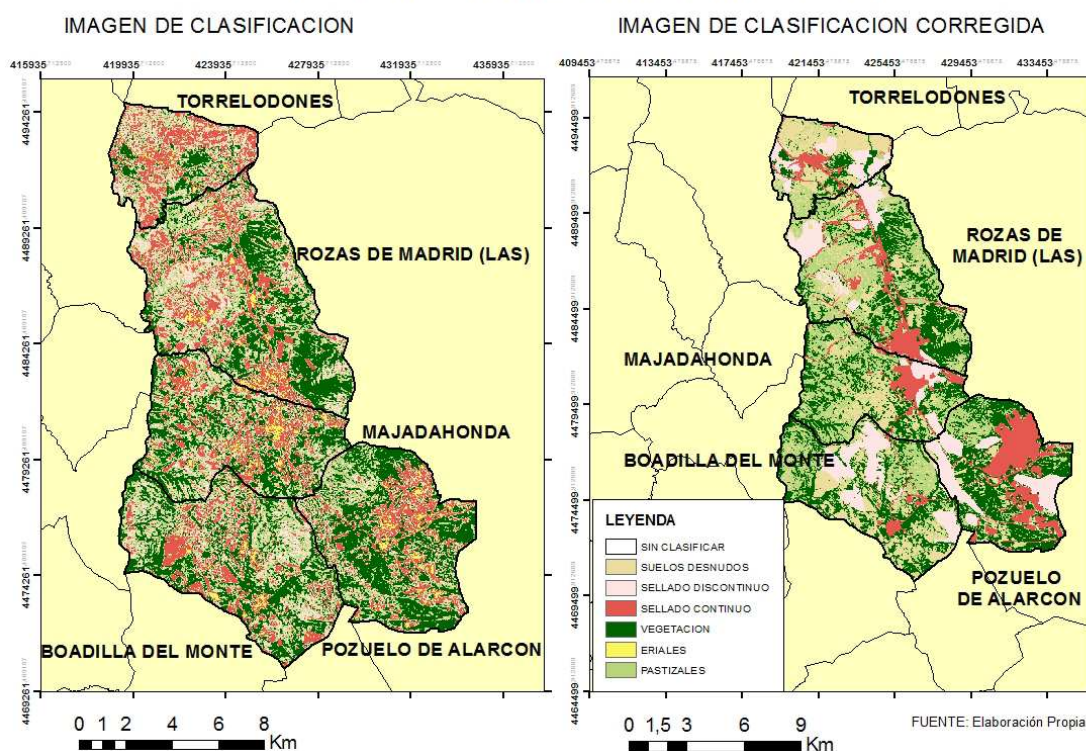


La correcciones se han hecho minuciosamente en las zonas de sellados, siendo lo fundamental en este estudio. Además con este índice se ha conseguido discriminar las carreteras, aun no siendo vías muy anchas, las clasificaba intermitentemente con lo que las que estaban en esta situación se han corregido haciendo su digitalización.

El uso de sellado discontinuo prácticamente no lo separaba en ninguno de los dos métodos, por lo que las zonas de chalets se han digitalizado desde la imagen Lansat, para su visualización. Aunque sí que es verdad que lo clasificaba como sellado, pero continuo que en este caso no lo era. Por lo que se ha corregido.

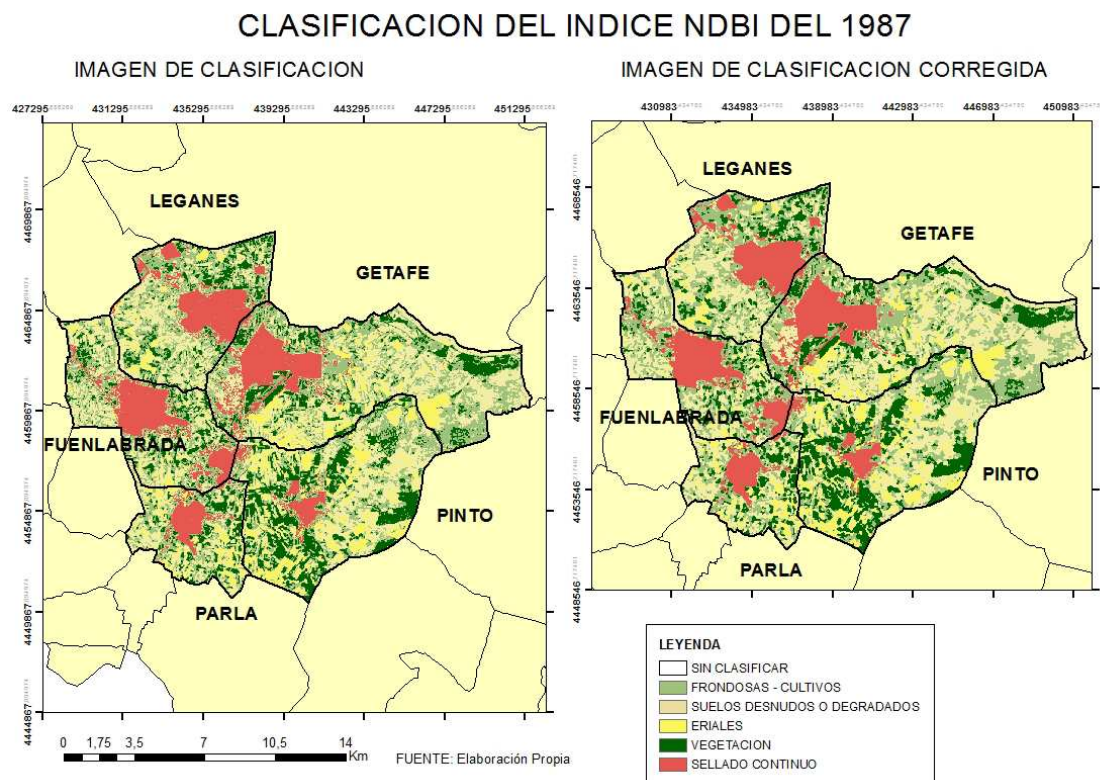
Por último, en esta imagen se han pasado todos los valores que se habían definido como erial a sellado continuo, puesto que esta clase solo se presentaba dentro de los núcleos urbanos y carreteras, donde no hay ningún erial. Así se tendrá ya bien definidas todas las clases y su representación se observa en la siguiente imagen.

### CLASIFICACION DEL INDICE SAVI DE 1987



#### 4. Zona 2. Clasificación del NDBI de 1987.

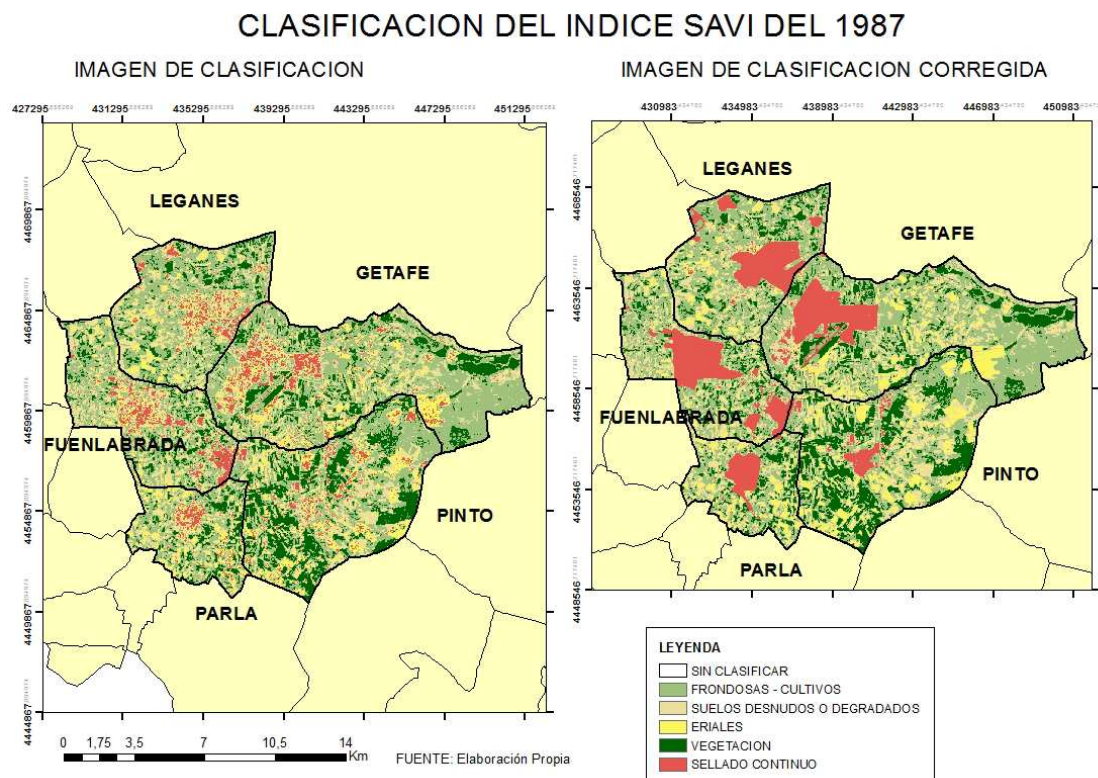
En esta imagen se tenía muchos valores de sellado continuo por zonas donde se sabe que no hay este tipo de suelo. Por eso se ha corregido a todo lo que estaba fuera del entorno urbano y estaba clasificado como ello, dándole categoría de suelo desnudo o degradado. Esta decisión se ha tomado porque había zonas que se sabía que eran suelos degradados, como uno de los márgenes del río Manzanares, o porque no es relevante para nuestro estudio, con lo cual se le da un uso que no cuenta para el sellado, pero tampoco dándole un uso de vegetación, ya que se sabe que por esta zona tampoco hay mucha. Aquí también se ha corregido la zonas urbanas, creando polígonos por donde se conoce que limitan y dando valor de suelos sellado a estos. Aunque tampoco había muchos píxeles de otra clase, estaban bastante bien definidos los núcleos urbanos.



#### 5. Zona 2. Clasificación del SAVI de 1987.

En cambio en esta clasificación los sellados continuos ofrecen mayor error, mezclando suelos sellados con suelos desnudos o degradados. Quedando los núcleos urbanos prácticamente enteros como suelo desnudo, por eso se ha corregido casi todo los valores de sellado continuo, creando un polígono que límite estos y cambiando la clase con la función *recode*, que lo modifica directamente en la tabla de atributos. Considerando que aquí mezcla o confunde las dos categorías, porque la diferencia entre las dos es mínima, pareciéndose más a suelo desnudo que ha sellado.





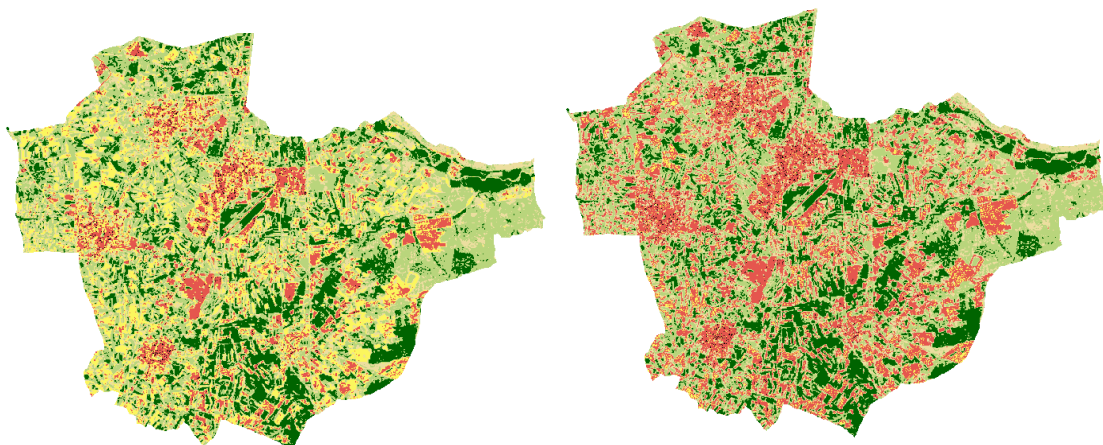
#### 6. Zona 2. Clasificación del NDVI de 1987.

Hechas todas las imágenes anteriores se descubre que si se clasifica el sellado de suelo en varias categorías se puede llegar a diferenciar mejor el suelo sellado, por lo que en este caso se han separado en tres clases pero con el mismo color, para después unir está en una sola que se llamara sellado continuo. Esto se hace porque hay muchos polígonos industriales que tienen un valor muy característico rozando el -1 y en cambio las carreteras o urbanizaciones más abiertas tienen valores mayores. Esto puede ser debido a los materiales con los que están contruidos.

En este caso se selecciona el método de mínimas distancias, que aunque no separa bien los núcleos urbanos, se tendrían que corregir, lo demás lo separa muy bien, teniendo que corregir menos zonas fuera de los entornos de sellado. Lo único que varían en los dos métodos es eso, en el de máxima probabilidad apenas aparecen eriales o barbechos, siendo estos todos suelos sellados y en cambio en el otro pasa lo contrario, aunque viéndose bien donde están los municipios y polígonos industriales.

En las imágenes de los años 87 no se van a tener en cuenta las carreteras porque en el mapa de suelo con el que se están comparando las imágenes, no aparecen estas. Además, sería difícil corregirlas y digitalizarlas, puesto que muchas de ellas no se aprecian bien.

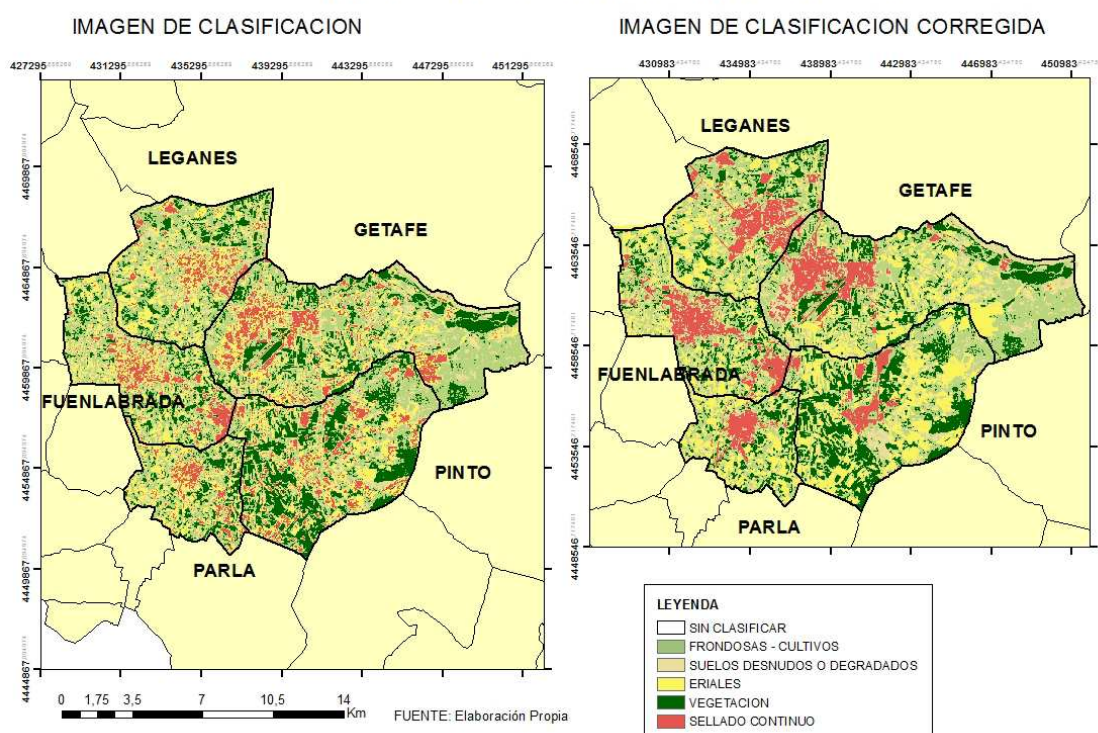
En las imágenes de abajo se ve con claridad lo que acabamos de explicar.



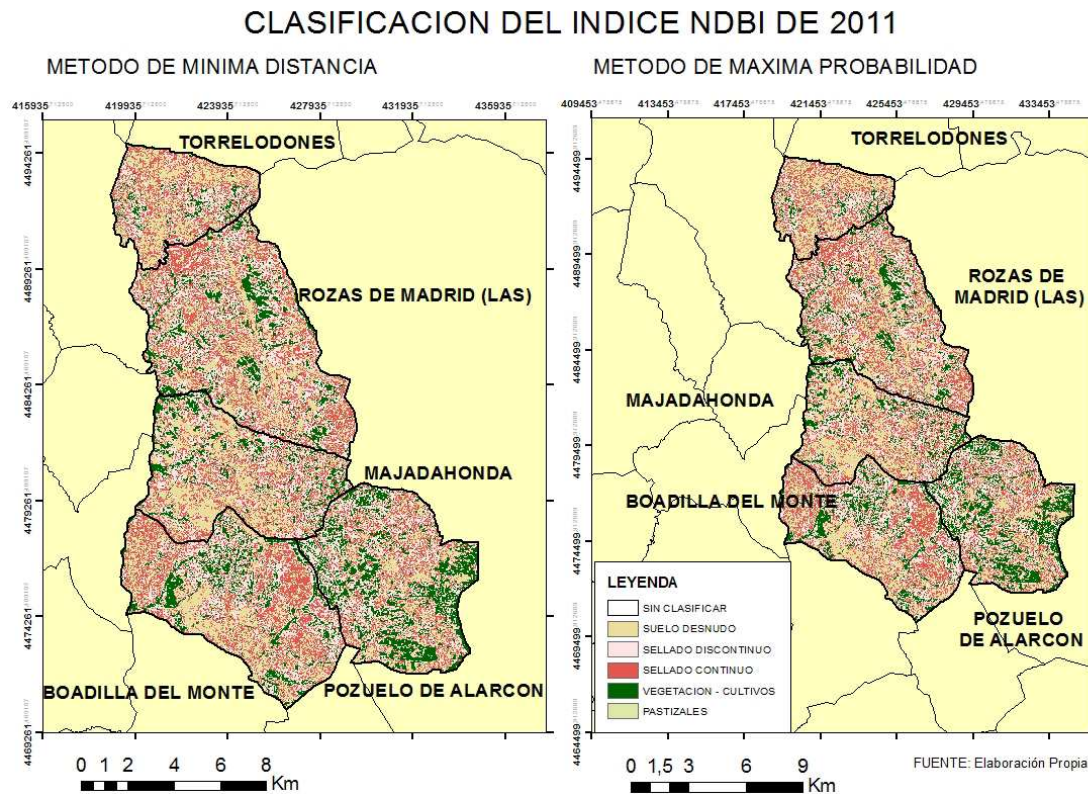
En las siguientes imágenes se ve la clasificación por el índice NDVI, a la izquierda se muestra el método de mínimas distancias y a la derecha el de máxima probabilidad, donde se aprecian claramente las diferencias entre ambas.

Debido a los errores que se han dado en las otras imágenes, que solares sin construir se mostraban como sellado y no lo eran, se opta por únicamente reclasificar valores de pixel erróneos, al tratarse de eriales o barbechos dentro del núcleo urbano. Aunque también puede ser debido a la diferencia de años entre las dos imágenes.

### CLASIFICACION DEL INDICE NDVI DEL 1987



## 7. Zona 1. Clasificación del NDBI de 2011.



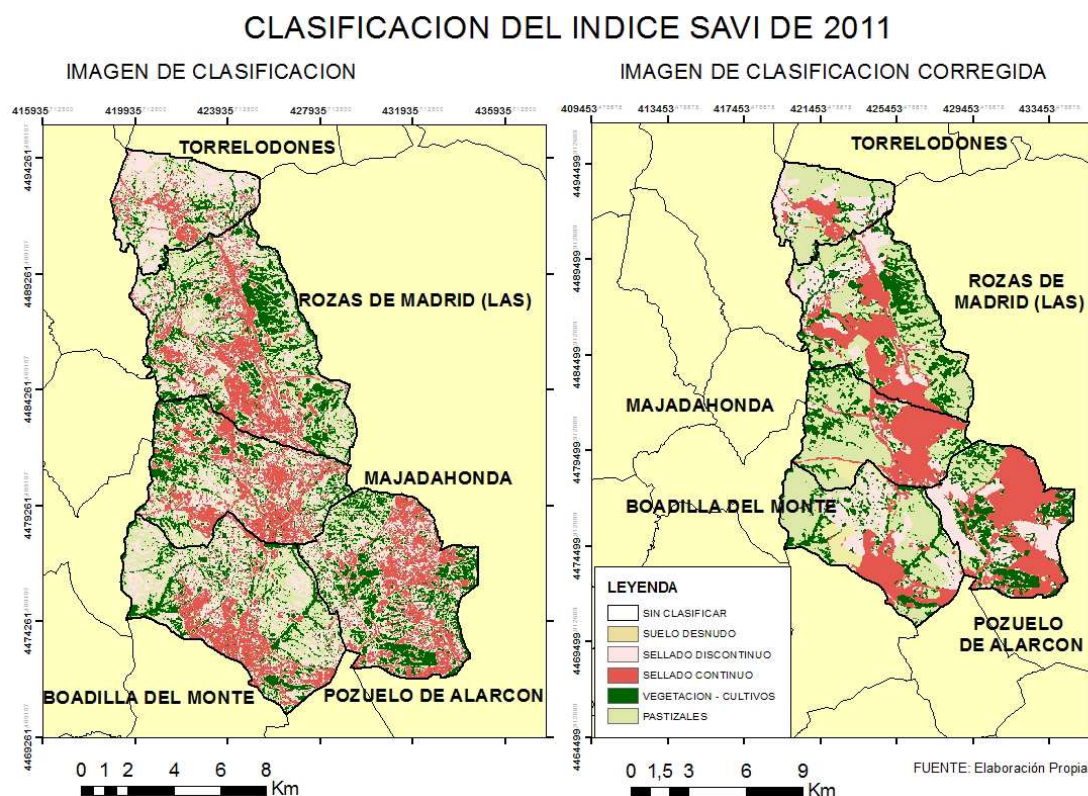
En esta imagen como en la del año 1987 los errores alcanzados son tan elevados que no sirve para clasificar el suelo construido, aunque el índice teóricamente sea idóneo para ello, ya que todo lo clasifica como suelo sellado con alguna zona de vegetación. Se tendría que digitalizar entera para poder corregirla, lo cual muestra la ineficacia de este método.

En este caso es difícil decidir cuál de los dos métodos es mejor, ya que si observamos la imagen prácticamente son idénticas. Siendo la vegetación lo que más resalta de ambas imágenes, aun siendo su clasificación errónea. Ya que hay en zonas donde muestra vegetación que lo que debería haber clasificado es sellado discontinuo pero con mucha vegetación. El problema en esta zona es que se tienen todos los usos bastante mezclados lo que no es muy adecuado para este índice.



## 8. Zona 1. Clasificación del SAVI de 2011.

En esta zona en general está siendo más difícil la clasificación en todos los índices, debido que hay mucha zona de chalet con mucha vegetación. Y confunde los valores ya que son los dos muy parecidos. Aunque es verdad que en el índice se discrimina muy bien esas zonas que se han clasificado como sellado discontinuo, por que aparecen con pixeles de muchos valores, por la vegetación y las construcciones. En cuanto a la corrección de clases, como se ha mencionado anteriormente la clase que mas error ha dado es la de sellado discontinuo, clasificando zonas de pastizal como sellados discontinuos y suelos con sellado discontinuo como vegetación, lo cual se intentara corregir con polígonos vectoriales y reclasificando los pixeles que se encuentren dentro de este.



## 9. Zona 1. Clasificación del NDVI de 2011.

Lo primero que se tiene en cuenta es que la clasificación se va realizar con la imagen Spot proporcionada por el IGN. Al hacer el índice se debe saber que el orden que le dan ellos a las bandas no es el habitual. Ordenándolas de la siguiente manera: Infrarrojo Cercano (NIR), Infrarrojo Medio (MIR), Roja (R) y Verde (V). Por lo que se tiene que tener en cuenta a la hora de hacer el índice, dándole el orden que debe seguir para crear la imagen.

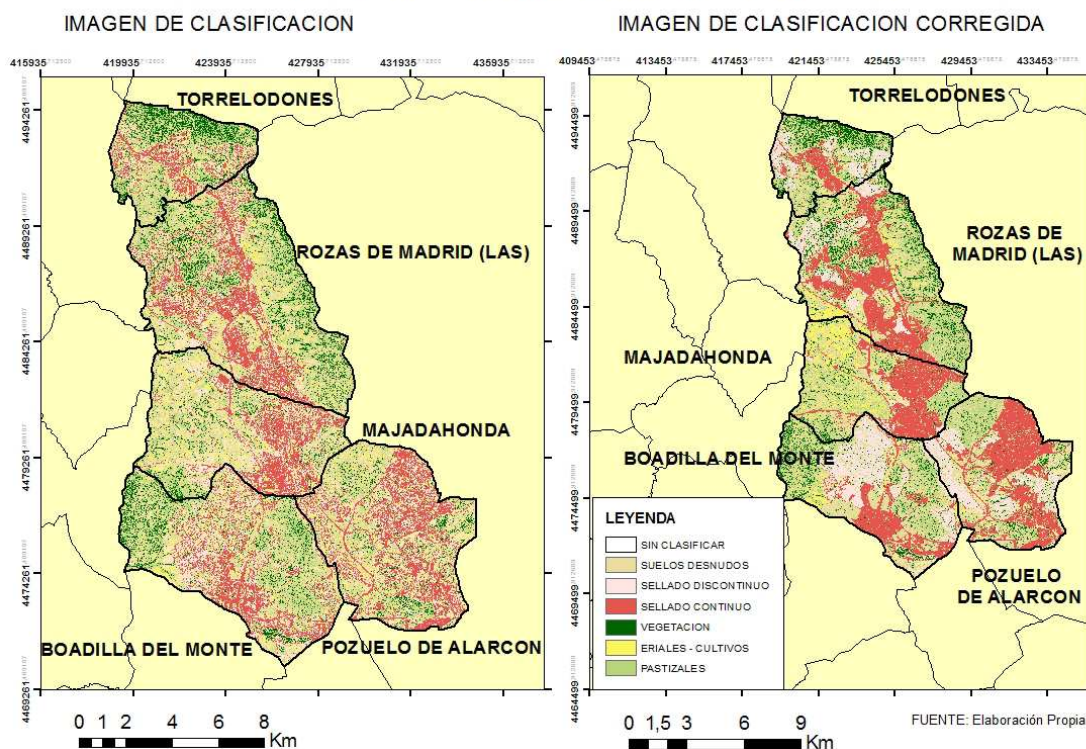
En la Zona 2 la clasificación se ha realizado en dos partes diferente, ya que al hacerse el mosaico de ambas se perdían muchos valores de pixel. En cambio en esta se va optar por hacer la clasificación a través del mosaico, aun habiendo perdido muchos valores. Para comparar los resultados con la clasificación de la Zona 2.

La clasificación que se ha efectuado es muy buena, separándose perfectamente todo el suelo sellado, el único problema es que el sellado discontinuo no se discrimina. Teniendo que corregir todos los valores que compongan este uso. Para ello se digitalizara muy fácilmente gracias a la resolución de la imagen.

En cuanto los dos métodos que se usan para el cálculo de clases en este caso los resultados también son iguales como en otras imágenes, pudiendo tener alguna diferencia despreciable. Por lo que se trabajara con el método de máxima probabilidad realizando todas las correcciones en esta imagen hasta conseguir la imagen final.

Las correcciones se han realizado sobre todo en las zonas donde encontramos zonas urbanas, ya que se tiene tanta resolución que se podría estar todo un día corrigiendo pixeles. También se ha corregido mucho suelo desnudo o erial que aparecía como sellado discontinuo, en esta clasificación ha sido uno de los errores más graves, confundiéndose entre ambos usos, aunque se separaban bien para poder realizar su corrección. Con esta clasificación se podrían haber corregido caminos, que estaban clasificados en algunos de sus pixeles, pero al digitalizarlo no se definían bien. Por lo que en la mayoría de los casos se han ignorado.

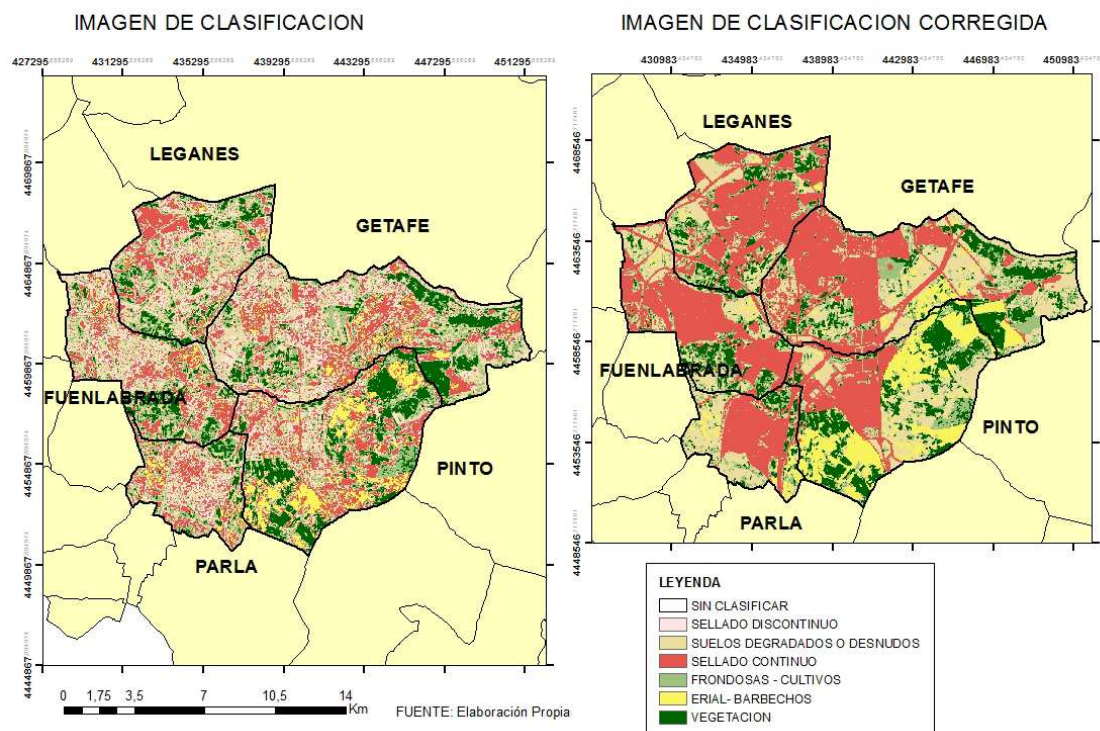
### CLASIFICACION DEL INDICE NDVI DE 2011



## 10. Zona 2. Clasificación del NDBI de 2011.

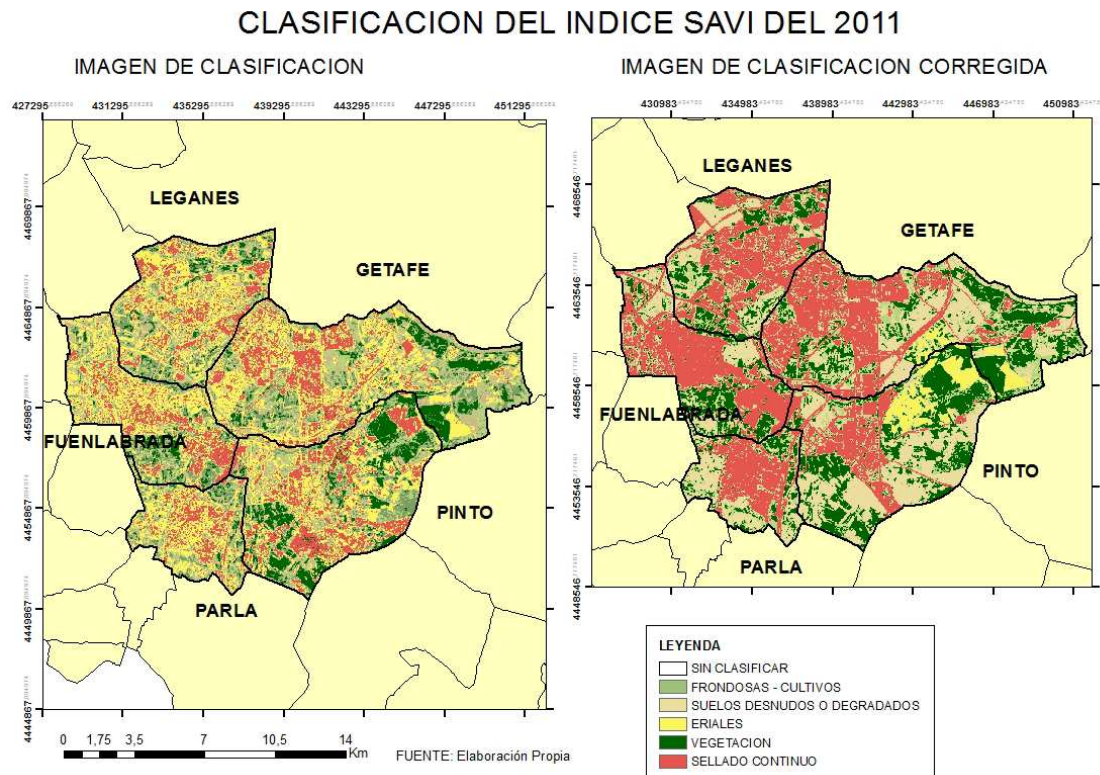
Los dos métodos de clasificación ofrecen buenos resultados por eso se ha pasado a corregir los dos para luego elegir el que menos errores contenga, para ello se va a unificar las dos clases de sellado que se han clasificado, ya que en el índice se veían muy diferentes y ha obligado a clasificarlo en dos clases diferentes, pero en realidad en esta zona solo se tienen sellados continuos. Como ya se ha hecho anteriormente unimos con *recode* los dos usos de sellado. En el método de máxima probabilidad. Lo que más se ha tenido que corregir son suelos desnudos que aparecen como sellados y viceversa. Sobre todo aparecen todas las carreteras como suelo desnudo o degradado. En el método de clasificación de mínimas distancias también se han unido las dos clases de sellado, y una vez unificado la clasificación es bastante fiable. Teniendo que corregir suelos desnudos y eriales dentro de urbano, esto puede ser debido a las urbanizaciones cerradas con jardines y plazas. Y como en la anterior se debe corregir suelos sellados donde se tienen suelos desnudos al borde de estos núcleos urbanos.

## CLASIFICACION DEL INDICE NDBI DEL 2011





## 11. Zona 2. Clasificación del SAVI de 2011.



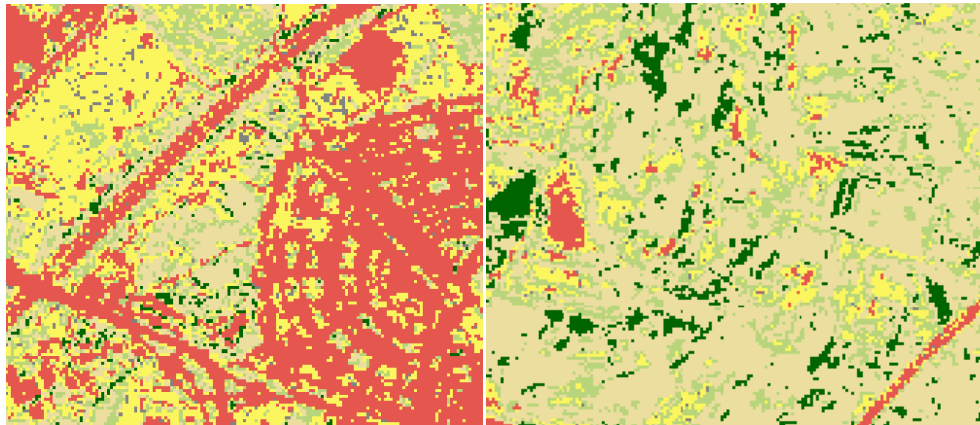
Aquí el problema ha sido que a la hora de clasificar, ha mezclado dos clases, clasificando la mayoría de suelo sellado como erial, sobre todo carreteras, calles y urbanizaciones, esto es debido a que los eriales tenían mayor valor que este, entonces los ha confundido como tal. Por lo que la solución ha sido unir estar dos clases. Una vez que se han unido lo que se ha reclasificado son las zonas no urbanas como posibles eriales, aunque podrían ser eriales como suelos desnudos.

## 12. Zona 2. Clasificación del NDVI de 2011.

La clasificación en esta imagen se ha realizado con las imágenes Spot del año 2011 y además en dos partes; debido a un error al construir el mosaico, para comprobar si con mayor resolución obtenemos mayor precisión en los resultados. Cabe destacar que la clasificación del sellado se ha realizado en dos clases de sellados diferentes, sellado continuo 1 y sellado continuo 2, ya que los valores de pixel variaban bastante, así la clasificación da mejores resultados. Luego se unirían con la herramienta *recode*, para que esta fuese una sola clase. Aquí se puede ver que clasifica las carreteras y las calles con bastante precisión. Incluso se ve que algún solar dentro del núcleo urbano lo discrimina con una clase diferente a la de sellado, como vegetación o suelo desnudo. Sí que es verdad que el resto de clases se han clasificado a conciencia, porque no entran dentro del área del estudio, saliendo estos bastante dispersos. Dando la mayoría de suelo como barbecho o suelos degradado. Para que la imagen no quede con tantos

polígonos pequeños se toma la decisión de unificar también los usos de suelo desnudo y barbechos o eriales.

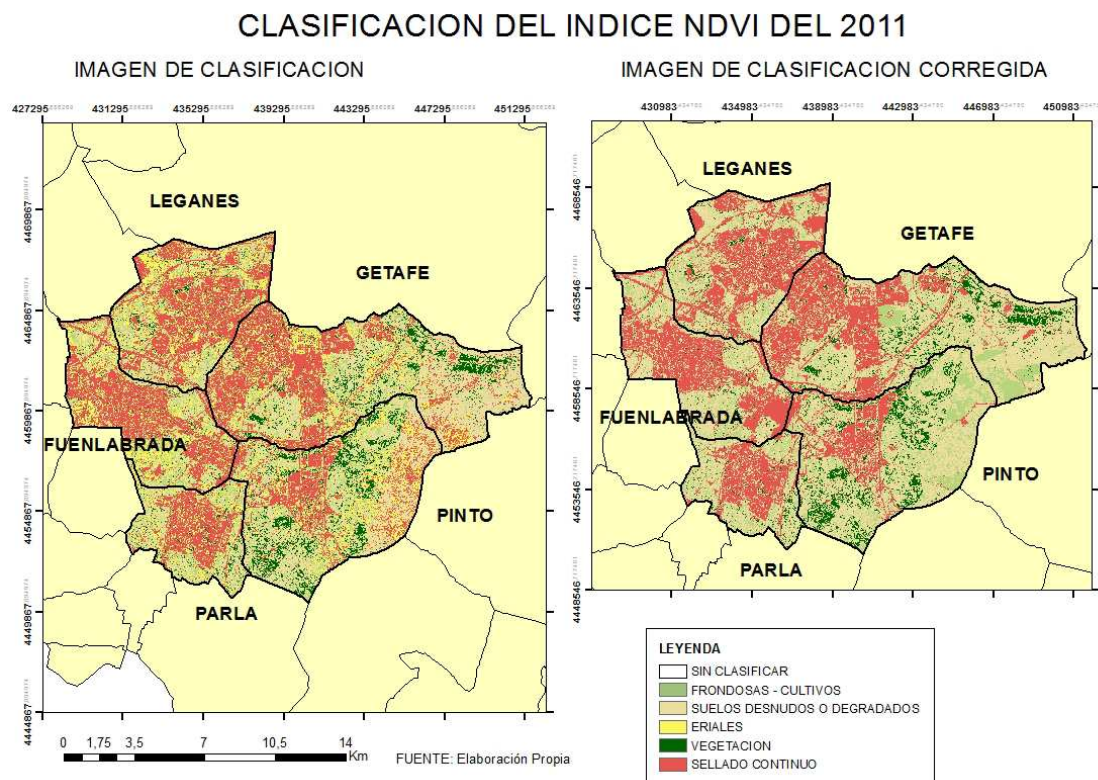
En cuanto a las correcciones de la imagen van ser mínimas, simplemente se corregirán polígonos de suelo sellado que se encuentren fuera de los núcleos y que se conozcan que no representan esta clase. Algunos píxeles que salen como barbechos y los distorsionan las vías de comunicación y zonas los municipios, así se tendrá mayor definición. Aunque no se han corregido todas las zonas urbanas ya que en algunas se diferenciaban muy mal los píxeles con valor de sellado con los de suelo desnudo. Dejándolos como están para no contaminar la clasificación.



**En las siguientes imágenes se ven los errores que se deben corregir, tanto en suelos sellados que vienen como barbechos o eriales; como se ve en la primera imagen, y suelos sellados que aparecen dentro de zonas sin construir, como se aprecia en la segunda imagen.**

Se ha observado que las zonas encharcadas o con pequeños estanques artificiales los muestra como suelos sellado, lo que en el caso de estos últimos es normal debido a que son charcas o lagunas artificiales con poca profundidad. Se deja como suelos sellados, sin llevar a cabo su corrección.

Por último se destaca que la clasificación con este índice ha sido más exacta y a simple vista la imagen generada concuerda con la realidad. Pero la corrección de esta imagen ha sido más laboriosa ya que se distinguían hasta caminos agrícolas que en algunos casos los hemos digitalizado como suelos sellados. Por otra parte en los núcleos urbanos se llegaban a diferenciar solares sin edificar, que en algunos casos los ha clasificado el programa y en otros los se han corregido manualmente. Aquí se ha empleado mucho más tiempo que en cualquier otra imagen de clasificación.



Una vez finalizadas todas las correcciones, a todas las imágenes se han pasado dos filtros de mejora de la imagen que son *Clump* y *Eliminate*. La función *Clump* agrupa píxeles vecinos con ND iguales, uniéndolos en una entidad y la función *Eliminate* elimina los polígonos pequeños, uniéndolos a los polígonos más grandes.

### 5.5. Evaluación de exactitud del suelo sellado de las diferentes clasificaciones.

Una vez que ya se tienen las imágenes corregidas y terminadas, se pasa a evaluar la exactitud de los suelos sellados. Para ello se necesita otras imágenes para poder compararlas con las clasificaciones. Las imágenes de más actualidad son las del año 2011 y se han comparado con las ortofotos de los años 2010 y 2011, lo cual debe proporcionar muy buenos resultados ya que son del mismo año. En cambio para valorar las del año 1987 ha sido más complicado, ya que no hemos encontrado ninguna ortofoto del mismo año, por lo que las comparaciones se van hacer con un mapa de suelos de Madrid del año 1980, lo que indica que no va tener tanta precisión como las imágenes actuales, sin embargo se podrán evaluar las clasificaciones.

Las ortofotos utilizadas para esta evaluación están descargadas del IGN, por lo que vienen georeferenciadas, únicamente las hemos cortado por las dos zonas de estudio para que su interpretación sea más sencilla. En cambio el mapa de suelos de la comunidad de Madrid se ha descargado de la página de cartografía de la Comunidad de Madrid, donde vienen sin georeferenciar, por lo que se han georeferenciado a través de las imágenes Landsat del estudio y como las anteriores se han cortado por zonas para identificar más rápido los puntos de evaluación.

Una vez que se tienen todas las imágenes preparadas se pasa a evaluar todas las clasificaciones que a priori ofrecen mejores resultados. A través del ERDAS se tiene una herramienta que genera puntos aleatorios en la clase que se selecciona, donde se van a analizar 50 puntos de los diferentes sellados, dependiendo la zona se tienen uno o dos, para ver cuántos de estos cumplen la clase que se les han asignado.

Esta comparación indica cuál de los índices resulta más preciso o fiable en cuanto al sellado de suelo, y cuál de esos puntos está verdaderamente dentro del uso de sellado y cuáles no. Una vez comparadas con las imágenes de comparación genera una tabla de resultados, donde da el porcentaje de exactitud que tiene la clasificación. Los datos se expresan en las tablas a continuación.

#### 1. IMAGEN SAVI MIN DEL 1987 DE LA ZONA 1

Nombre de la clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
SELLADO CONTINUO	17	21	14	82,35%	66,67%
SELLADO DISCONTINUO	14	29	14	100,00%	48,25%
SUELO DESNUDO	19	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>28</b>		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 56.00%</b>					

En la tabla anterior se puede ver que el porcentaje no es muy bueno, pero esto es debido a que el mapa de suelos de Madrid es anterior a nuestra imagen, exactamente siete años, donde se ha podido construir gran cantidad de suelo. En el mapa podemos ver que hay polígonos dispersos de construcción, pero en cambio en las imágenes el índice y la imagen indican que hay suelos sellados entre ellos, dando polígonos más continuos. Y muchos de los puntos de evaluación caen dentro de estos. Además otro porcentaje de puntos quedaban muy cerca del polígono de suelos, pudiendo haber crecido la zona construida en los 7 años de diferencia que hay entre imágenes.

En esta evaluación no se puede hacer caso con que tipo de uso confunde al suelo sellado este índice, ya que a todo lo que estaba fuera de los polígonos de construido se le ha dado uso de suelo desnudo, ya que en esta imagen no se ve que es ese punto. Esto último se ha aplicado en todas las imágenes que se han usado en el mapa del suelo de los años 80.

## 2. IMAGEN SAVI MIN DEL 1987 DE LA ZONA 2

Nombre de la clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
SELLADO CONTINUO	40	50	40	100,00%	80,00%
ERIAL	-	-	-	-	-
SUELO DESNUDO	10	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	50	50	40		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 80.00%</b>					

En esta zona solo se han discriminado en un tipo de sellado, ya que en esta zona sur no se encuentran tanto chalet, como para clasificarlo en sellado continuo y discontinuo. Por lo que solo se ha evaluado un sellado, y para verlo comparado con una imagen 7 años anterior a la del estudio ha dado muy buenos resultados, tanto como las imágenes que se han tomado como actuales. Aquí como en la anterior la mayoría de puntos erróneos han dado cerca de los polígonos que se refieren ha construido y puede ser el salto de años que tienen las imágenes, pudiendo haber crecido los núcleos urbanos que se encuentran en la zona.

## 3. IMAGEN NDBI MAX DEL 1987 DE LA ZONA 2

El error en esta imagen no ha sido bueno, tendría que haber dado un porcentaje mayor de 80% para que la clasificación hubiese tenido precisión. Aunque se ha aceptado por la diferencia de años entre imágenes. No pudiendo confirmar del todo los resultados. Como en las anteriores también se tienen puntos de evaluación cerca de la clase se suelo urbano. Aunque también han salido puntos alejados, donde no ha podido llegar la construcción. Esto último puede ser debido a que la clasificación no ha sido tan buena como debería, dando lugar al incremento del error. También cabe decir que en la reclasificaciones hay veces que el suelo desnudo se confunde o se asemeja a zonas de sellado discontinuo. Y también pueden ser improductivos permanentes que se encuentran en alguna parcela agraria, que llevan a confundir. Con lo que no se han corregido.

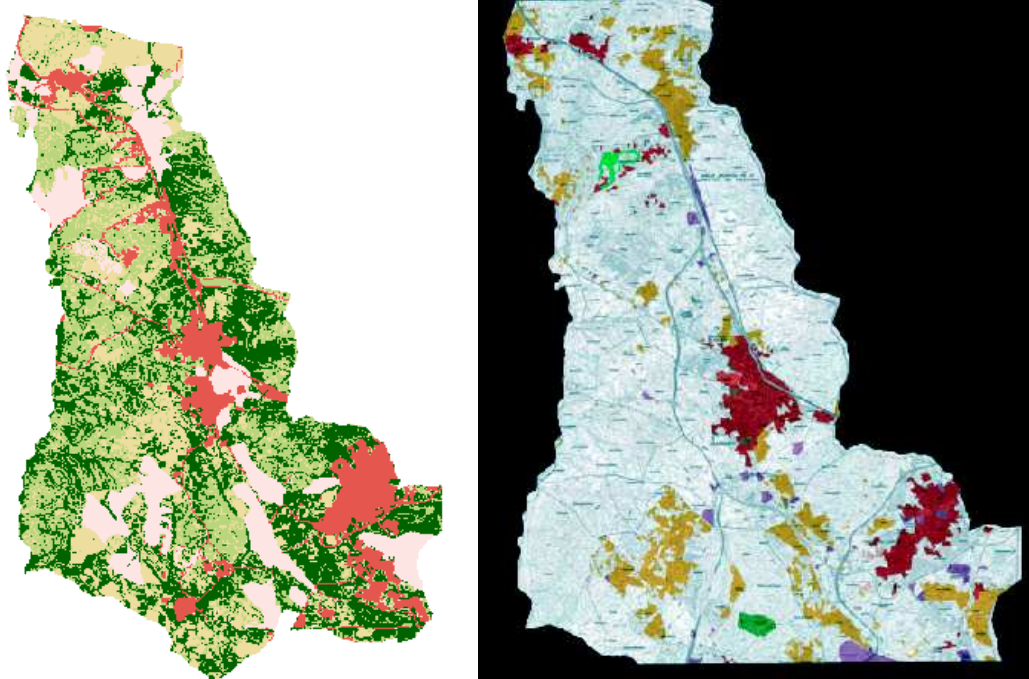
Nombre de la clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
SELLADO CONTINUO	34	50	34	100,00%	68,00%
ERIAL	-	-	-	-	-
SUELO DESNUDO	16	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	50	50	34		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 68.00%</b>					



#### 4. IMAGEN NDVI MIN DEL 1987 DE LA ZONA 1.

En esta imagen el total de la exactitud es bastante malo, ya que apenas supera el 50%, aunque como ya se ha mencionado anteriormente es por la imagen con la que se ha comparando. Pero en mi opinión ha sido lo que mejor resultados ha tenido, aunque en la tabla de exactitud no han sido buenos los resultados. Ya que ha sido el único índice que ha clasificado las carreteras menos importantes, que apenas se marcan en la imagen con una fila de píxeles. Y ya las vías más importante y anchas no ha habido que corregirlas, han salido automáticamente. Por lo que es un paso importante en comparación con las anteriores.

Este buen resultado con las vías de comunicación no se puede comparar con la imagen comparación (Mapa de suelos 1980), porque la imagen no estaba georeferenciada con precisión. Debido a que ha sido difícil encontrar puntos bien definidos en ambas imágenes



**De izquierda a derecha tenemos las imágenes de clasificación por el índice NDVI del año 1987 y el mapa de suelos de la Comunidad de Madrid del año 1980, son las que se necesitan para la evaluación.**

La evaluación de puntos ha tomado 19 puntos en sellado continuo, de los que no han llegado a coincidir ni la mitad de ellos. Quedando muchos de ellos muy cercanos a zonas construidas o entre dos polígonos de zonas residenciales. En cambio en sellado discontinuo a tomado 31 puntos de evaluación, pero tampoco estos han tenido muy buena exactitud pasando esta justo por encima de la mitad. Siendo la misma causa que en los puntos de sellado continuo. Este es porque la clasificación tiene polígonos de sellado más continuos que la imagen de comparación, pudiéndose haber expandido en estos 7 años los municipios, llenando los huecos que tenía el mapa de suelos.

En la siguiente tabla se pueden observar los datos que acabamos de comentar.

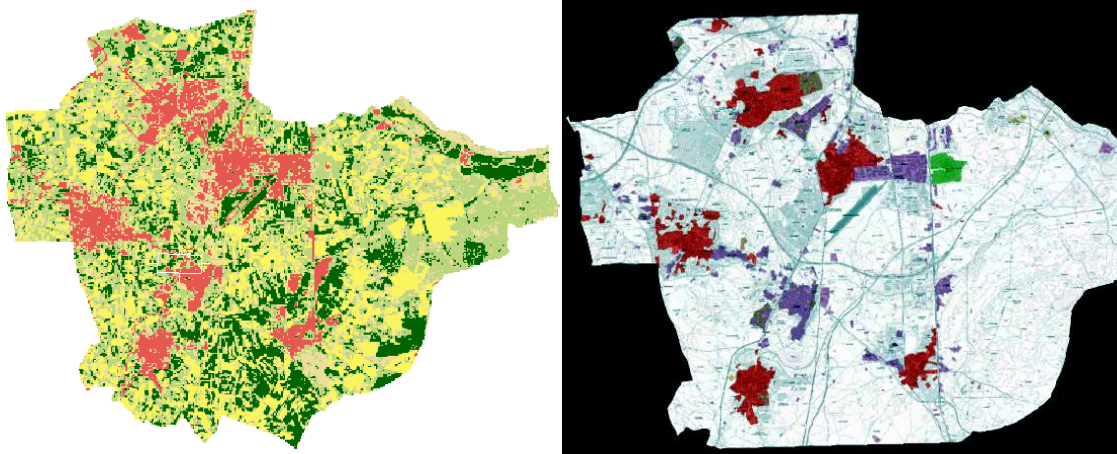


Nombre de la clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
SELLADO CONTINUO	9	19	9	100,00%	47,37%
SELLADO DISCONTINUO	17	31	17	100,00%	54,84%
SUELO DESNUDO	24	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>26</b>		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 52.00%</b>					

## 4. IMAGEN NDVI MIN DEL 1987 DE LA ZONA 2.

Nombre de la clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
SELLADO CONTINUO	36	50	36	100,00%	72,00%
ERIAL - BARBECHO	-	-	-	-	-
SUELO DESNUDO	14	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>36</b>		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 72.00%</b>					

En esta última imagen del año 1987, se ha intentado hacer una clasificación diferente, sin hacer polígonos cerrados, para diferenciar solares y otros elementos que se encuentran dentro de los municipios. Pero en realidad, la decisión no ha aportado los resultados esperados, ya que tenía que haber dado un porcentaje de exactitud parecido al del índice SAVI. Pero no ha sido así, ha dado más bajo porcentaje de acierto, lo que dice que el SAVI es mejor índice o que la decisión en cuanto a las correcciones no ha sido acertada. Puesto que si el polígono es cerrado como en la imagen de evaluación tiene más probabilidades de acierto, ya que se asemeja más al del mapa de suelos con el que se está comparando. Otro de los problemas que ha podido causar este porcentaje bastante regular, como se ha comentado en todas las anteriores, la diferencia de años entre ellas. Porque muchos de los puntos de evaluación se encuentran muy cerca de los polígonos que dicen que están contruidos, por lo que han podido llegar 7 años después las edificaciones hasta ese punto. Por desgracia no se va a poder comprobar ya que no tenemos ortofotos del mismo año. Si que se han encontrado imágenes Spot del año 84, con la composición de bandas de color natural. No obstante al descárgalas las imágenes perdían los colores de las bandas, siendo esta ilegible.



De izquierda a derecha tenemos la imagen de clasificación por el índice NDVI del año 1987 y el mapa de suelos de la Comunidad de Madrid del año 1980, son las que se necesitan para la evaluación.

##### 5. IMAGEN SAVI MAX DEL 2011 DE LA ZONA 1.

Nombre de la clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
SELLADO CONTINUO	24	27	23	95,83%	85,19%
SELLADO DISCONTINUO	15	23	15	100,00%	65,22%
SUELO DESNUDO	4	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	4	-	-	-	-
VEGETACION	3	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>38</b>		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 76.00%</b>					

Esta clasificación ha dado bastantes malos resultados, se debería haber conseguido un porcentaje por encima del 80%. Y eso que a la hora de evaluar los puntos, se han dado como puntos correctos a los puntos que han caído dentro de suelos desnudos o de jardines que se encuentran dentro de núcleo urbano y continuo, esta decisión se ha tomado por la resolución que tienen las imágenes, siendo esta muy pequeña para diferenciar estas parcelas.

Los malos resultados han podido ser porque fue la primera imagen que se generó y no se corrigió tan bien como las siguientes, ya que cada vez se interpretan mejor las imágenes y los índices. También puede ser debido a que la clasificación de los sellados discontinuos ha sido complicada, ya que en el índice esas zonas son fáciles de diferenciar al ojo, pero muy difíciles de clasificar, por no tener un valor continuo y homogéneo, sino que salen píxeles de todo tipo de valores.

## 6. IMAGEN NDVI MAX DEL 2011 DE LA ZONA 1.

Nombre de la clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
SELLADO CONTINUO	31	37	31	100,00%	83,78%
SELLADO DISCONTINUO	13	13	12	92,31%	92,31%
SUELO DESNUDO	4	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	1	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
ERIAL	1	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>43</b>		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 86.00%</b>					

En la tabla de evaluación se observa que se han obtenido unos resultados muy buenos, consiguiéndose una exactitud del 86%. Aunque se podría haber conseguido mejor porcentaje. Analizando los puntos de evaluación se analiza que la corrección de la imagen podía haber sido más precisa. Puesto que hay zonas donde dentro de los núcleos tenemos muchos suelos sin construir los que no se han modificado. Y muchos de los puntos de suelo desnudo que se expresan como sellado son de este caso. En cambio el de pastizal y erial son puntos que caen muy cerca de sellados, que por la resolución de la imagen son inevitables.

## 7. IMAGEN SAVI MAX DEL 2011 DE LA ZONA 2

Aquí se han tenido muy buenos resultados casi rondando el 90%, esto quiere decir que solo 8 puntos de los evaluados han dado fuera de suelo sellado. Aquí solo se podía haber tenido mejores resultados si la imagen hubiese tenido mejor resolución, ya que la mayoría de los puntos erróneos han sido en bordes de la clase de sellado, donde dependen del tamaño de pixel. Con la imagen de alta resolución se podría haber llegado a un 100% de acierto.

Nombre de la clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Users Accuracy
SELLADO CONTINUO	44	50	50	100,00%	88,00%
ERIAL	-	-	-	-	-
SUELO DESNUDO	6	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>44</b>		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 88.00%</b>					

## 8. IMAGEN NDBI MAX DEL 2011 DE LA ZONA 2

Nombre de la Clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	UsersAccuracy
SELLADO CONTINUO	42	50	42	100,00%	84,00%
SUELO DEGRADADO O DESNUDO	6	-	-	-	-
FONDOSAS - CULTIVOS	2	-	-	-	-
ERIAL	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	50	50	42		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 84.00%</b>					

Los resultados en esta imagen han sido tolerables, pero podrían haber sido mejores si la imagen habría tenido una mejor resolución, a consecuencia de esto la mayor parte de los errores han dado en los bordes de las carreteras, ya que muchas de las carreteras tienen menos anchura que lo que mide nuestro pixel. Dando carreteras con mayor amplitud de la real o viceversa.

## 9. IMAGEN NDVI MAX DEL 2011 DE LA ZONA 2.

En esta zona que está hecha con imágenes Spot esta dividida en dos partes como hemos explicado en el apartado anterior, por lo que para hacer la evaluación solo se han usado la parte 1 que contiene la mayor parte de la Zona 2, ya que la clasificación de la segunda parte el índice no era tan bueno como el de la otra parte, dando peores resultados. Por lo que para la evaluación se ha despreciado, usándolo únicamente para la visualización de la zona completa.

Esta zona ya que a simple vista parecía que se tenían muy buenos resultados, se han llevado a cabo una comprobación de los resultados sin llegar a corregir el suelo sellado y el resultado ha sido muy bueno dando un 94% de acierto en la clase de suelos sellado, únicamente con tres errores, los cuales han dado los tres en bordes de carreteras y cerca de caminos asfaltados, como observamos en las siguientes imágenes.



De izquierda a derecha tenemos la imagen clasificada sin corregir el suelo sellado de la Zona 2 y la ortofoto de la Zona 2, las dos del 2011.

La tabla que se muestra a continuación expresa los datos de la comprobación que se ha realizado antes de corregir el uso de suelo sellado.

Nombre de la Clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Producers Accuracy
SELLADO CONTINUO	47	50	47	100,00%	94,00%
ERIAL - BARBECHO	-	-	-	-	-
SUELO DESNUDO	3	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
TOTAL	50	50	47		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 94.00%</b>					

Una vez que se han cambiado de valor los píxeles del suelo sellado, aunque la corrección podía haber sido más detallada, pero había valores que se confundían con suelo desnudo por lo que se han dejado como los ha dejado la clasificación automática, ya que si no se está seguros es mejor dejar los valores que ha proporcionado el programa. Terminado este índice se hace la evaluación de la imagen y da el mejor resultado que hemos obtenido en esta zona hasta ahora con un 96% de aciertos, con lo que se verifica que la resolución de la imagen Spot mejora los resultados considerablemente. Además aquí el índice NDVI es muy bueno porque da valores muy diferentes para las zonas de sellado, clasificándolas más fácilmente que en los demás.

En la siguiente tabla mostramos los resultados de evaluación:

Nombre de la Clase	Referencias Totales	Clasificados Totales	Número Correcto	Producers Accuracy	Producers Accuracy
SELLADO CONTINUO	48	50	48	100,00%	96,00%
ERIAL - BARBECHO	-	-	-	-	-
SUELO DESNUDO	2	-	-	-	-
PASTIZALES - CULTIVOS	-	-	-	-	-
VEGETACION	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	50	50	48		
<b>EXACTITUD TOTAL DE LA CLASIFICACIÓN = 96.00%</b>					

### 5.6. Comparación y cálculo de la pérdida de suelos en cada zona.

Finalmente, se va a calcular la pérdida de suelo que se ha producido en cada zona y cuanto se ha variado entre 1987 y 2011. Se elige la mejor clasificación obtenida y para ello se elegirá en función del porcentaje de acierto de cada una de ellas. Con lo que las imágenes de cálculo van a ser para la Zona 1; Clasificación SAVI de 1987 y Clasificación SAVI del 2011 y la para la Zona 2; Clasificación SAVI de 1987 y Clasificación SAVI de 2011, esta última debería de ser el NDVI ya que tiene mejor porcentaje de todos, pero se tiene el problema que no se pueden unir las dos imágenes y al tener zonas comunes entre las dos partes las áreas serían erróneas. Con estas cuatro imágenes y la opción de a calcular el área en la tabla atributos se calculará todo a través de una hoja de cálculo.

#### - ZONA 1

Nombre de la Clase	Índice	Año	Área (ha)	Variación	Porcentaje
SELLADO CONTINUO	SAVI	1987	1976,22	Aumento sellado continuo	Aumento sellado continuo
	SAVI	2011	5361,66	3385,44	16,13%
SELLADO DISCONTINUO	SAVI	1987	2571,93	Aumento sellado discontinuo	Aumento sellado discontinuo
	SAVI	2011	3917,61	1345,68	6,41%
<b>TOTAL DE SUELO SELLADO 1987</b>			4548,15	Aumento de suelo sellado	Aumento de suelo sellado
<b>TOTAL DE SUELO SELLADO 2011</b>			9279,27	4731,12	22,54%
RESTOS DE SUELOS	SAVI	1987	16445,25	Pérdida de suelo	Pérdida de suelo
	SAVI	2011	11703,33	4741,92	22,59%
<b>TOTAL DE SUELO 1987</b>			20993,4	-10,8	Error
<b>TOTAL DE SUELO 2011</b>			20982,6		-0,05%

En la tabla se muestran los resultados de los cálculos realizados a través de las imágenes clasificadas, donde cabe destacar el aumento de suelo sellado en 22,59% del total de los suelos de la Zona 1, lo que corresponde a un total de 4.741,92 hectáreas de suelo sellado. De las cuales el 16,13% equivalen a sellado continuo; donde entran urbanizaciones, edificios, zonas industriales, etc., y 6,41% de sellados discontinuo que comprenden las zonas de chalets donde el sellado del suelo no es completo.



En la tabla se tienen dos campos que representan lo mismo que son pérdida de suelo y aumento de suelo sellado, estos deberían tener valores iguales, pero no es así. Ya que en las imágenes hay píxeles que tienen valor cero y clasificándolos así por no pertenecer a ninguna clase, en algunas se han intentado corregir dándoles valor de la clase a la que corresponden con la herramienta que hemos usado también para reclasificar, pero algunas ocasiones no nos damos cuenta y se quedan que este valor. Esto hace que nuestros porcentajes tengan un error de 0,05%, el cual se puede despreciar.

#### - ZONA 2

Nombre de la Clase	Índice	Año	Área (ha)	Variación	Porcentaje
SELLADO CONTINUO	SAVI	1987	2928,6	Aumento sellado continuo	Aumento sellado continuo
	SAVI	2011	8641,98	5713,38	23,12%
RESTOS DE SUELOS	SAVI	1987	21778,23	Pérdida de suelo	Pérdida de suelo
	SAVI	2011	16172,37	5605,86	22,69%
TOTAL DE SUELO 1987			24706,83	107,52	Error
TOTAL DE SUELO 2011			24814,35		0,44%

Cabe destacar que en este caso el error es más grande que en la zona anterior se va por unas 100 ha. Más o menos, aunque sigue sin llegar al 1%, lo que no es tan preciso como el anterior, pero sigue siendo fiable. Estas diferencias de superficie de suelo, es como se ha comentado antes por píxeles que tienen valor de 0, se han intentado corregir, pero en esta zona había muchos y muy dispersos e individuales por lo que se han dejado unos cuantos errores. En cuanto a los datos obtenidos muestran que se han perdido unas 5605,86 ha. De suelo, que equivale a un 23% de del total de la superficie. Además fijándose en las hectáreas que se tenían en el 87 y las que hay en el 2011, se puede decir que casi se han triplicado, aumentando en un 23% de total.

Seguramente si se tuvieran datos e imágenes más actuales de este año o del año pasado, se vería que todavía han aumentado más la cifra de suelo sellado, puesto que se siguió construyendo, aunque en el año 2008 se freno un poco y fue el aumento bastante menos. Ya que el país entro en una crisis muy fuerte derivada de la construcción. Por lo que se dejo de construir bastante.

### 5.7. Mejoras que se podrían realizar a la imagen de clasificación final.

Finalmente una vez que ya se ha terminado la metodología de clasificación, debemos depurar y eliminar polígonos de sellado erróneos. Para obtener una capa perfecta de sellado se suelo de los municipios del estudio.

El primer paso sería pasarlo a una extensión con la que trabaje el programa ArcGis, ya con este programa es más fácil y rápido digitalizar. Por tener más herramientas de dibujo que el ERDAS. Para dar este paso el ERDAS tiene una herramienta que convierte la clasificación en una capa shp. Con la que podríamos trabajar directamente en el ArcGis.

Una vez hecho esto solo tendríamos que eliminar los polígonos erróneos y digitalizar todo lo que en la clasificación se ha pasado. Para esto se trabajaría con la ortofoto que se usado para

la comparación y evaluación de la imagen. Este último proceso es muy laborioso y largo. Pero conseguiríamos unas capas perfectas para hacer cualquier proyecto de análisis de sellado en estos municipios.

## 6. Resultados (Discusión).

El presente estudio demuestra que la elección del índice utilizado para clasificar las imágenes determinara la calidad de los resultados. Sobre todo dependiendo de qué coberturas este compuesta la zona a clasificar. Ya que en la Zona 1 se ha tenido que desechar el índice NDBI, por no identificar correctamente el suelo sellado. En cambio en la Zona 2, todos los índices definían bien los suelos sellados. Cabe destacar que en esta zona no se tiene suelo sellado discontinuo que es el más difícil de discriminar y además no hay tantos tipos de suelos, siendo la clase de sellado más continua.

El índice que mejor resultados proporciona es el NDVI, con el cual se han conseguido un 96% de exactitud en la clasificación. Aunque este también ha sido mejorado con la resolución de la imagen Spot. Pero si se habla en el global de todas, el que mejores resultados ha obtenido ha sido el índice SAVI, pudiendo ser porque este separa muy bien el suelo de la vegetación. Además de que las imágenes elegidas son de mayo donde todavía se encuentra bastante vegetación.

En definitiva cualquier índice de vegetación que se utilice para mejorar la metodología proporcionará buenos resultados, teniendo también en cuenta que tipo de vegetación tiene la zona de estudio y cuál es el periodo del año que están tomadas las imágenes de satélite. Todo esto mejorará las clasificaciones de suelo sellado, dando resultados casi perfectos.

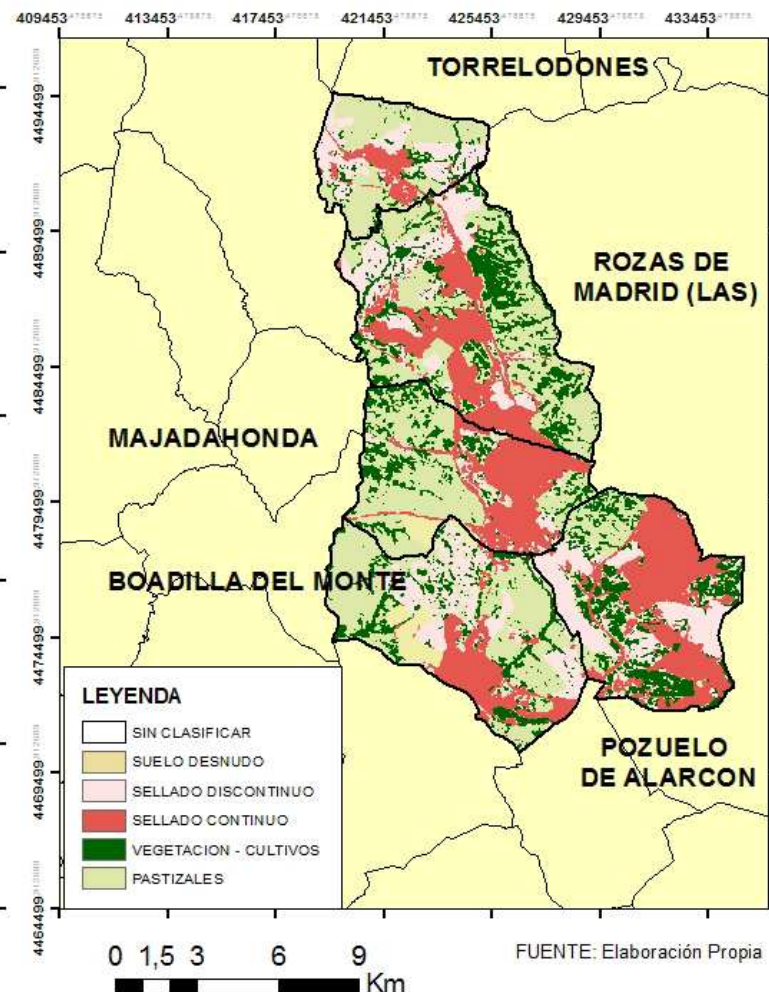
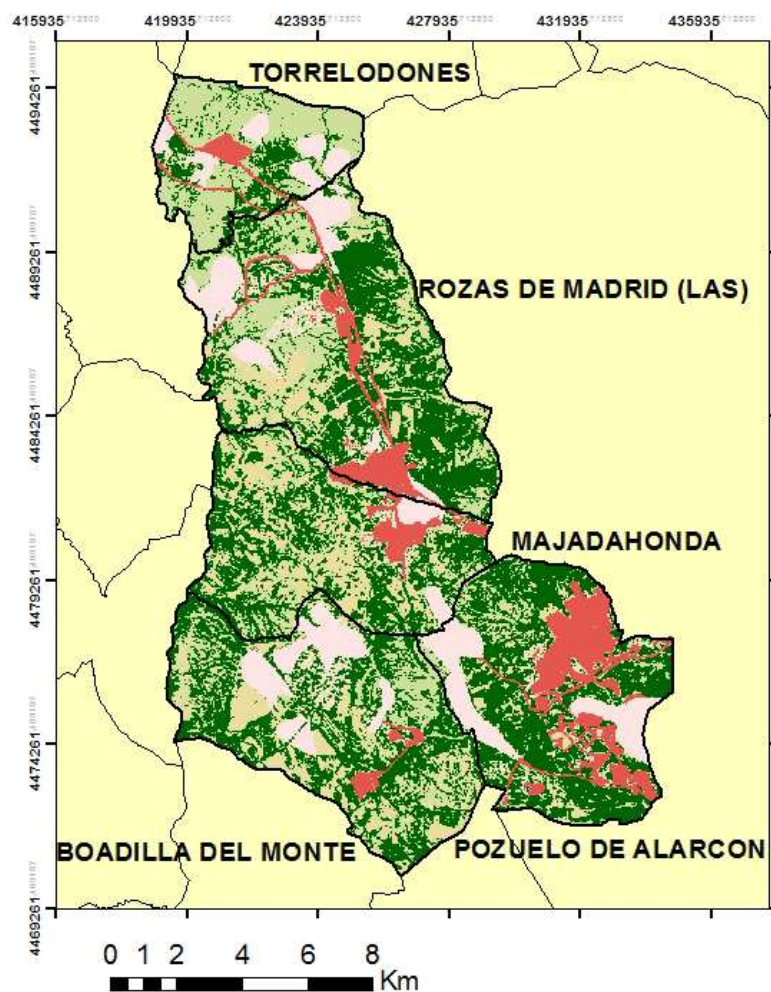
Otra de las dificultades que se han encontrado en las clasificaciones de los índices, son los suelos sellados discontinuos que se encuentran en la Zona 1. Ya que visualmente son muy fáciles de diferenciar, porque son valores de pixel heterogéneos. Pero a la hora de representar un uso para clasificarla según sus valores es muy difícil, puesto que estos suelos los representa con varios valores diferentes de pixel. Debido a esto el programa hace una media que no es muy real y por eso al crear la imagen los mezcla con otro tipo de suelos o clases.

En las siguientes páginas se muestran los resultados de mapas de clasificación de suelos sellados a través de diferentes índices obtenidos en nuestro estudio.

# CLASIFICACION DE LA ZONA 1 A TRAVES DEL INDICE SAVI

07 MAYO DE 1987

09 MAYO DE 2011

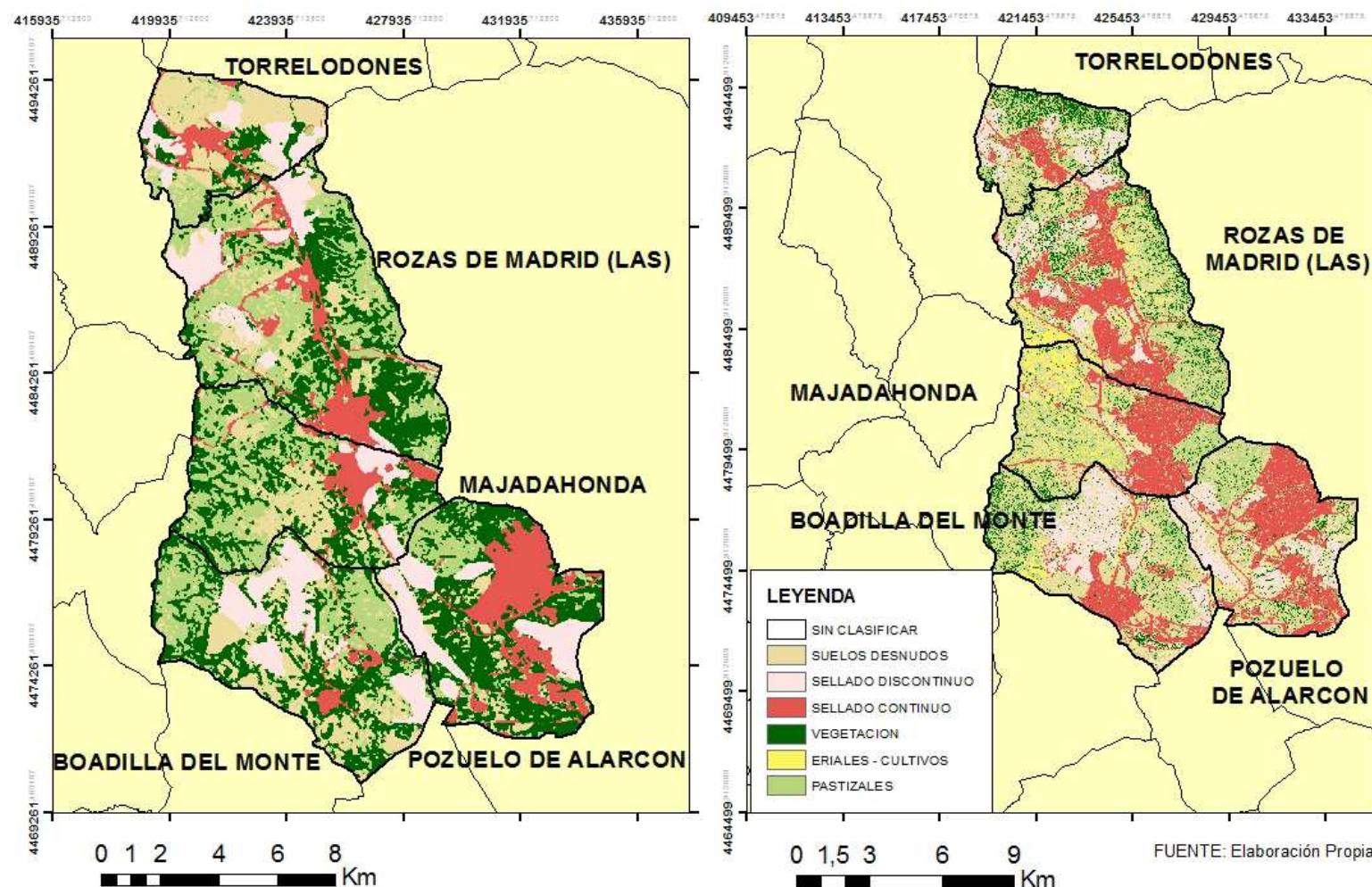




## CLASIFICACION DE LA ZONA 1 A TRAVES DEL INDICE NDVI

07 MAYO DE 1987

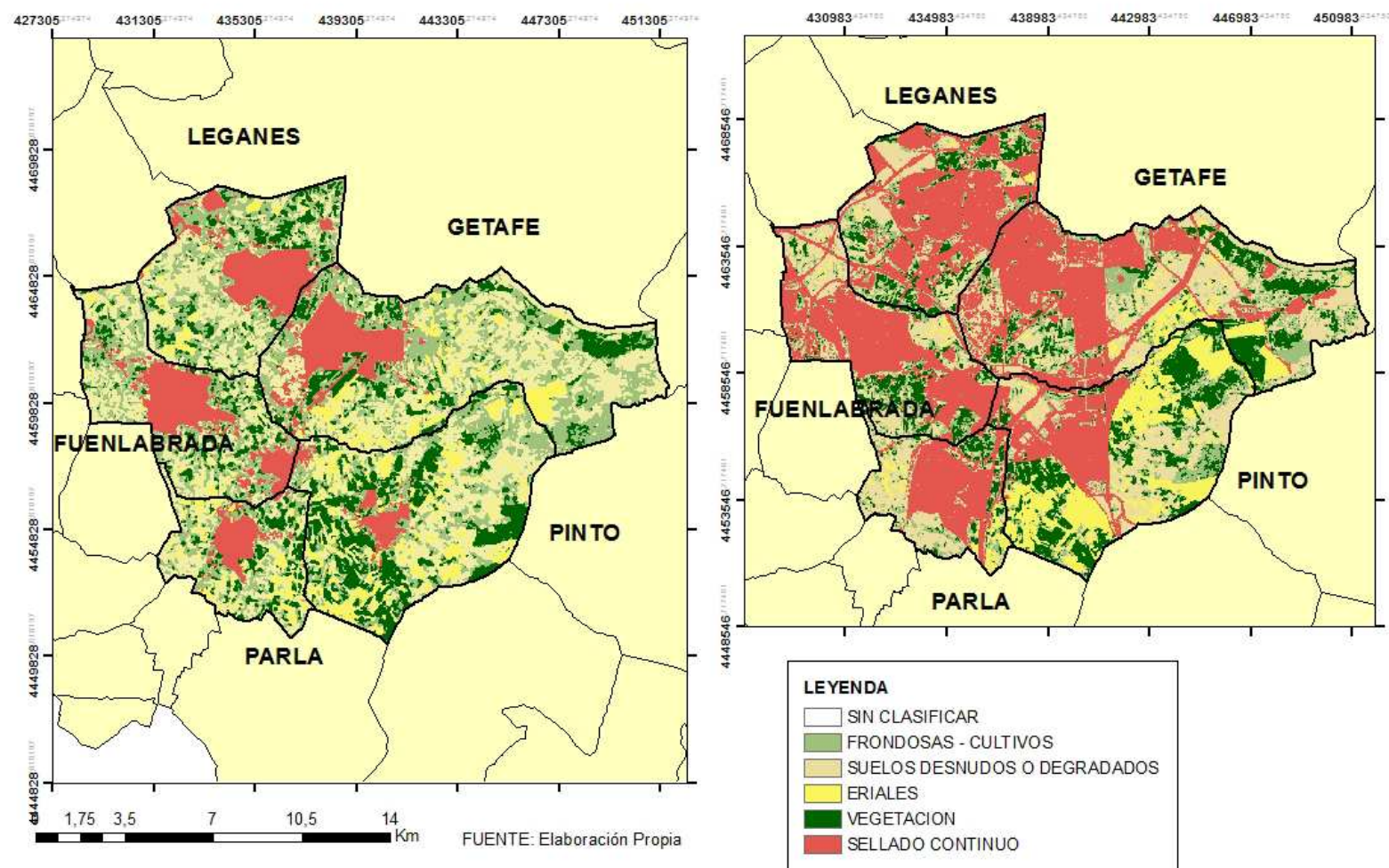
09 MAYO DE 2011



## CLASIFICACION DE LA ZONA 2 A TRAVES DEL INDICE NDBI

07 MAYO DE 1987

09 MAYO DE 2011

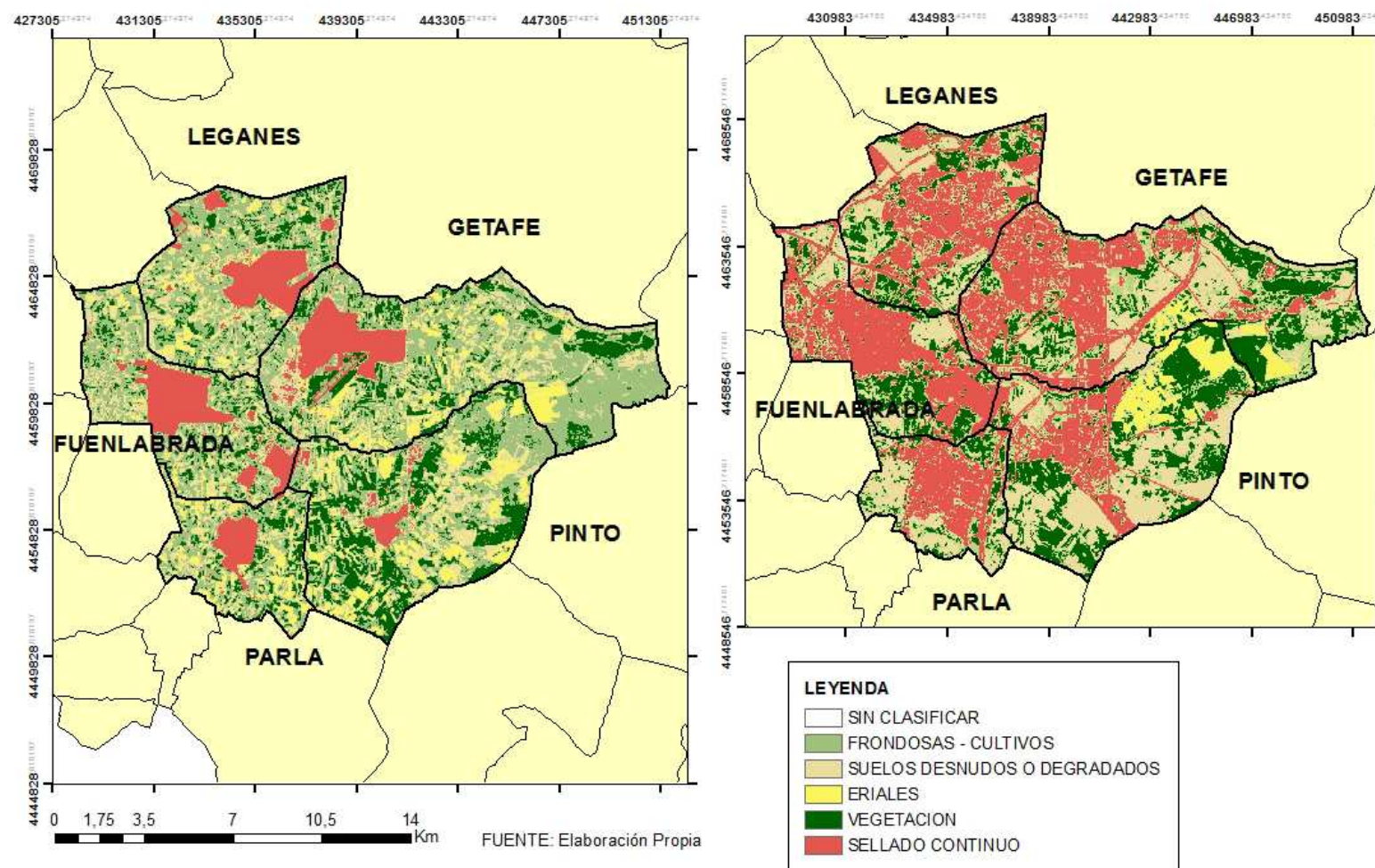




## CLASIFICACION DE LA ZONA 2 A TRAVES DEL INDICE SAVI

07 MAYO DE 1987

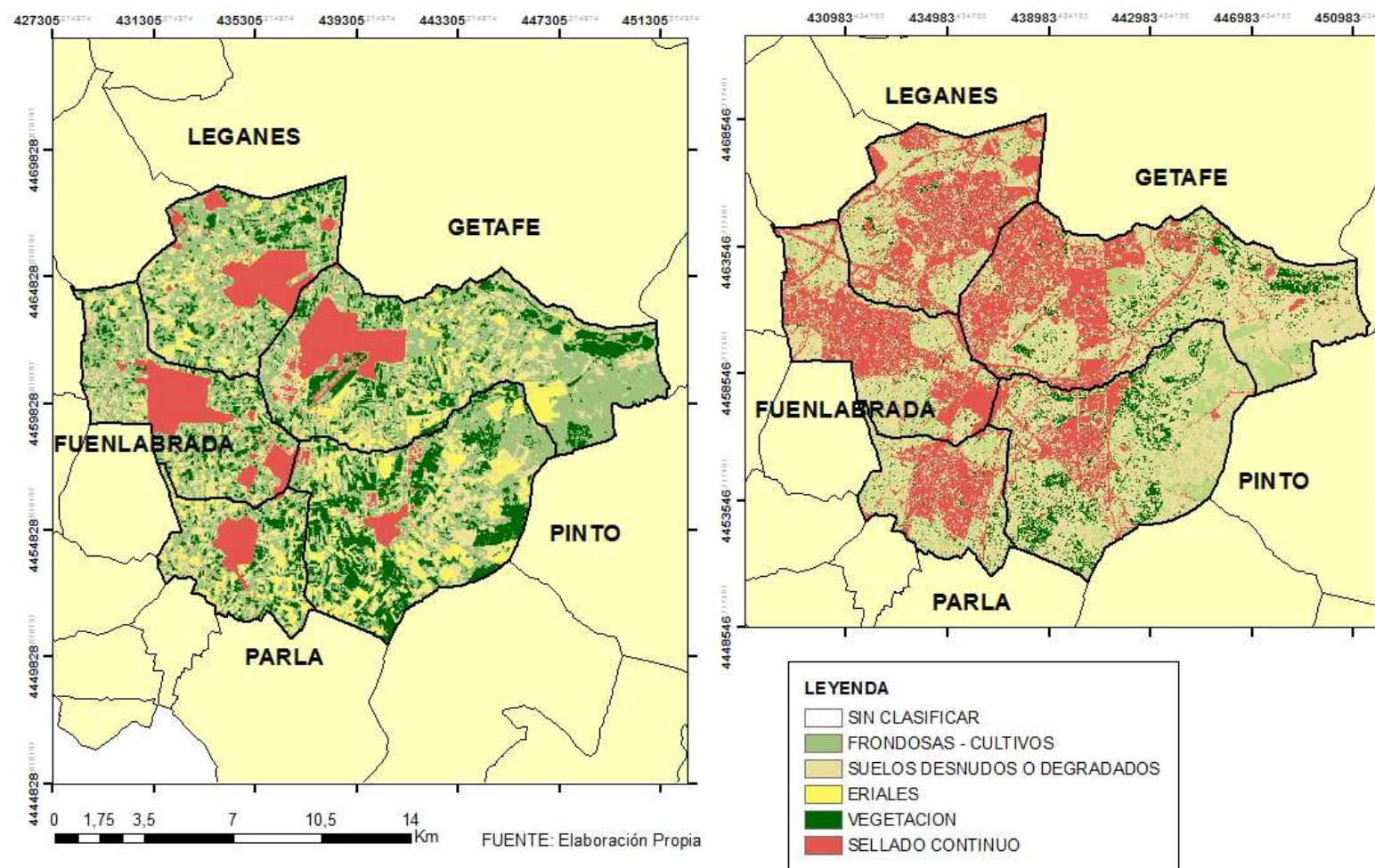
09 MAYO DE 2011



## CLASIFICACION DE LA ZONA 2 A TRAVES DEL INDICE NDVI

07 MAYO DE 1987

09 MAYO DE 2011



Durante el estudio se han encontrado muchas limitaciones y problemas que se han tenido que ir resolviendo según iban apareciendo. El primero de ellos ha sido el no poder utilizar las imágenes Spot para el índice NDVI del año 2011. Las dos zonas de estudio pertenecían a dos imágenes diferentes, lo cual estaban formadas por dos partes cada una. Antes de unirla se debía crear el índice NDVI, para que no se cambiaran los valores. El problema venía que a la hora de hacer el mosaico con las dos partes de la zona, el mosaico perdía muchos valores del índice los cuales cogían valor cero. Esto provoca que se pierda mucha información y no se iba a poder demostrar que cuanto más resolución tiene la imagen mejores resultados se obtienen. Al final para poder demostrarlo se ha realizado con la imagen de la zona 2 que tenía más suelos sellado el cual ha dado un porcentaje de acierto del 96% el mejor de todas las imágenes clasificadas. Esto es debido que la clasificación automática es mejor por la resolución y aparte de que a la hora de corregir al tener mayor resolución la digitalización y separación de coberturas es más sencilla y fácil. Después de hacer esta imagen se ha realizado la clasificación del NDVI a través del mosaico, obteniendo buenos resultados, con porcentaje de exactitud del 86%, aunque la pérdida de información no da tan buena precisión como en el caso de la Zona 2. Consiguiendo mejores resultados con el índice SAVI, que está realizada con una imagen Landsat que tiene peor resolución.

## **7. Conclusiones.**

El sellado de suelos se ha incrementado en un 23% del total de la superficie entre los años 1987 y 2011, en los municipios situados al noroeste de la capital y los que encuentran al sur de esta.

En la Zona 2, que se encuentra al sur de Madrid, se ha pasado de tener un 12% de suelo sellado a un 35%, triplicándose la superficie de suelo sellado. La mayoría del aumento del suelo sellado se encuentra en los polígonos industriales de Getafe y Pinto hacia el oeste, quedando en esta área poca zona sin construcciones, debido a la cercanía con la capital y el suelo en esta parte de Madrid es más económico. Reflejándose claramente en los mapas elaborados.

En la Zona 1, que corresponde a los municipios del noroeste, el incremento de suelo sellado es de un 23%, observando que en el 1987 se tenía un 22% de suelo sellado y en 2011 ha alcanzado un 45%, duplicándose esta superficie. Aquí la pérdida de suelo se ha producido sobre todo en las cercanías de las vías de comunicación A-6 y M-50, comprobando el aumento de sellado discontinuo conforme nos vamos alejando de ambas vías, como se observa en la imágenes finales. Cabe destacar que en esta zona el suelo está dividido en dos sellados, continuo y discontinuo. El sellado discontinuo provoca medioambientalmente menos problemas, pese a esto el sellado continuo ha aumentado en un 16% del total de la superficie y en cambio el discontinuo únicamente sube en un 6%.

Se puede observar que en ambas zonas el incremento de porcentaje de suelo sellado entre los años 1987 y 2011 es similar, indicando que en ambas zonas se ha producido un boom constructivo, estando actualmente la zona noroeste más saturada, aunque con la ventaja de tener sellado discontinuo.

## **8. Agradecimientos.**

Este Trabajo Fin de Máster se ha realizado aplicando parte de la metodología del Proyecto CSO2012-34785 titulado " Sellado de suelos en la Comunidad de Madrid y áreas limítrofes: estudio mediante Teledetección y Sistemas de Información Geográfica".



## 9. Bibliografía.

B. SÁNCHEZ, F. MORAL, A. GONZÁLEZ Y R. ESCUDERO. (2009): Proyecto ftssoil sealing (sellado de suelo) en España y Portugal.

CARLOS AÑÓ VIDAL, JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR Y JUAN SÁNCHEZ DÍAZ (2005): Capacidad de uso y sellado antropogénico del Suelo en la franja litoral de la provincia de Castellón.

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2003): COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL CONSEJO Y AL PARLAMENTO EUROPEO. Desarrollo del concepto del ciclo de vida medioambiental.

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2002): Comunicación de la comisión al consejo, el parlamento europeo, el comité económico y social y el comité de las regiones.

COMISION EUROPEA (2011): Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions.

COMISION EUROPEA (2012): DOCUMENTO DE TRABAJO DE LOS SERVICIOS DE LA COMISIÓN Directrices sobre mejores prácticas para limitar, mitigar o compensar el sellado del suelo.

COMISION EUROPEA (2012): Los costes ocultos del sellado del suelo. En busca de alternativas a la ocupación y el sellado del suelo.

DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA, 28.1. (2012): Directiva 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de diciembre de 2011, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.

GARCÍA ALVARADO, JM. GARCÍA RODRÍGUEZ, M<sup>a</sup> P. Y PÉREZ GONZÁLEZ, M<sup>a</sup> E. (2014): Revisión del concepto de sellado de suelos y propuesta de tipología urbana. Financiado con el Proyecto Nacional del Ministerio de Economía y Competitividad N<sup>o</sup> CSO2012-34785

GARCÍA RODRÍGUEZ, M<sup>a</sup> P. Y PÉREZ GONZÁLEZ, M<sup>a</sup> E. (2011): Sellado de fluvisoles en la comunidad de Madrid análisis a partir de imágenes Landsat. Anales de Geografía de la Universidad Complutense, 31:125-137.

GONZALES DE AUDICANA, M. SECO, A. Y GARCIA, R. (2001): Comparación de diferentes métodos de fusión de imágenes Spot 4 multiespectrales y pancromáticas. Universidad Pública de Navarra.

LOPEZ FALCON ROBERTO (2002): Degradación del suelo, causas, procesos e investigación. Serie: Suelos y Clima. SC- 75 CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACION AMBIENTAL Y TERRITORIAL UNIVERSIDAD DE LOS ANDES Mérida, Venezuela 2002

PÉREZ GONZÁLEZ, M<sup>a</sup> E. Y GARCÍA RODRÍGUEZ, M<sup>a</sup> P. (2013): Aplicaciones de la Teledetección en degradación de suelos. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 61, 285-308.

PÉREZ GONZÁLEZ, M<sup>a</sup> E. Y GARCÍA RODRÍGUEZ, M<sup>a</sup> P. (2013): Sellado de suelos en áreas con riesgo de inundación. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física Universidad Complutense de Madrid. C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid.

AYUNTAMIENTO DE BOADILLA DEL MONTES (2014):

<http://ayuntamientoboadilladelmonte.org/>

AYUNTAMIENTO DE MAJADAHONDA (2014):

<http://www.majadahonda.org/ciudad/losdatos.html>

AYUNTAMIENTO DE PARLA (2014): <http://www.ayuntamientoparla.es>

AYUNTAMIENTO DE POZUELO DE ALARCON (2014): <http://www.pozuelodealarcon.org/>